



Numéro d'Ordre : 548 SGE

THÈSE

présentée par

Jean-Marc TACNET

pour obtenir le grade de Docteur de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines
de Saint-Etienne

Spécialité : Sciences et Génie de l'Environnement

Prise en compte de l'incertitude dans l'expertise des risques naturels en montagne par analyse multicritères et fusion d'information

soutenue à Saint-Etienne le 26 novembre 2009 devant le jury composé de :

Présidente : Valérie NOVEMBER
Rapporteur : Gilles DUSSERE
Rapporteur : Pierre VALIN
Examineur : Jean DEZERT
Examineur : Didier RICHARD

Directrice de thèse : Mireille BATTON-HUBERT
Co-directeur : Didier GRAILLOT

Professeur, EPFL, Lausanne (Suisse).
Directeur de Recherche, EMA, Alès.
Professeur, Univ. Laval et Mc Master (Canada).
Ingénieur/Chercheur, ONERA, Châtillon.
Ingénieur en Chef des Ponts, des Eaux et des
Forêts, *Cemagref*, Grenoble.
Maître-Assistant (HDR), ENSM-SE, Saint-
Etienne.
Directeur de Recherche, ENSM-SE, Saint-
Etienne.

Spécialités doctorales :

SCIENCES ET GENIE DES MATERIAUX
 MECANIQUE ET INGENIERIE
 GENIE DES PROCEDES
 SCIENCES DE LA TERRE
 SCIENCES ET GENIE DE L'ENVIRONNEMENT
 MATHEMATIQUES APPLIQUEES
 INFORMATIQUE
 IMAGE, VISION, SIGNAL
 GENIE INDUSTRIEL
 MICROELECTRONIQUE

Responsables :

J. DRIVER Directeur de recherche – Centre SMS
 A. VAUTRIN Professeur – Centre SMS
 G. THOMAS Professeur – Centre SPIN
 B. GUY Maître de recherche – Centre SPIN
 J. BOURGOIS Professeur – Centre SITE
 E. TOUBOUL Ingénieur – Centre G2I
 O. BOISSIER Professeur – Centre G2I
 JC. PINOLI Professeur – Centre CIS
 P. BURLAT Professeur – Centre G2I
 Ph. COLLOT Professeur – Centre CMP

Enseignants-chercheurs et chercheurs autorisés à diriger des thèses de doctorat (titulaires d'un doctorat d'Etat ou d'une HDR)

AVRIL	Stéphane	MA	Mécanique & Ingénierie	CIS
BATTON-HUBERT	Mireille	MA	Sciences & Génie de l'Environnement	SITE
BENABEN	Patrick	PR 2	Sciences & Génie des Matériaux	CMP
BERNACHE-ASSOLANT	Didier	PR 0	Génie des Procédés	CIS
BIGOT	Jean-Pierre	MR	Génie des Procédés	SPIN
BILAL	Essaid	DR	Sciences de la Terre	SPIN
BOISSIER	Olivier	PR 2	Informatique	G2I
BOUCHER	Xavier	MA	Génie Industriel	G2I
BOUDAREL	Marie-Reine	MA	Génie Industriel	DF
BOURGOIS	Jacques	PR 0	Sciences & Génie de l'Environnement	SITE
BRODHAG	Christian	DR	Sciences & Génie de l'Environnement	SITE
BURLAT	Patrick	PR 2	Génie industriel	G2I
COLLOT	Philippe	PR 1	Microélectronique	CMP
COURNIL	Michel	PR 0	Génie des Procédés	DF
DAUZERE-PERES	Stéphane	PR 1	Génie industriel	CMP
DARRIEULAT	Michel	IGM	Sciences & Génie des Matériaux	SMS
DECHOMETS	Roland	PR 1	Sciences & Génie de l'Environnement	SITE
DESRAYAUD	Christophe	MA	Mécanique & Ingénierie	SMS
DELAFOSSSE	David	PR 1	Sciences & Génie des Matériaux	SMS
DOLGUI	Alexandre	PR 1	Génie Industriel	G2I
DRAPIER	Sylvain	PR 2	Mécanique & Ingénierie	SMS
DRIVER	Julian	DR	Sciences & Génie des Matériaux	SMS
FEILLET	Domirique	PR 2	Génie Industriel	CMP
FOREST	Bernard	PR 1	Sciences & Génie des Matériaux	CIS
FORMISYN	Pascal	PR 1	Sciences & Génie de l'Environnement	SITE
FORTUNIER	Roland	PR 1	Sciences & Génie des Matériaux	SMS
FRACZKIEWICZ	Anna	DR	Sciences & Génie des Matériaux	SMS
GARCIA	Daniel	CR	Génie des Procédés	SPIN
GIRARDOT	Jean-Jacques	MR	Informatique	G2I
GOEURLOT	Domirique	MR	Sciences & Génie des Matériaux	SMS
GOEURLOT	Patrice	MR	Sciences & Génie des Matériaux	SMS
GRAILLOT	Didier	DR	Sciences & Génie de l'Environnement	SITE
GROSSEAU	Philippe	MR	Génie des Procédés	SPIN
GRUY	Frédéric	MR	Génie des Procédés	SPIN
GUILHOT	Bernard	DR	Génie des Procédés	CIS
GUY	Bernard	MR	Sciences de la Terre	SPIN
GUYONNET	René	DR	Génie des Procédés	SPIN
HERRI	Jean-Michel	PR 2	Génie des Procédés	SPIN
INAL	Karim	MR	Microélectronique	CMP
KLOCKER	Helmur	MR	Sciences & Génie des Matériaux	SMS
LAFOREST	Valérie	CR	Sciences & Génie de l'Environnement	SITE
LERICHE	Rodolphe	CR	Mécanique et Ingénierie	SMS
LI	Jean-Michel	EC (CCIMP)	Microélectronique	CMP
LONDICHE	Henry	MR	Sciences & Génie de l'Environnement	SITE
MOLIMARD	Jérôme	MA	Mécanique et Ingénierie	SMS
MONTHEILLET	Frank	DR 1 CNRS	Sciences & Génie des Matériaux	SMS
PERIER-CAMBY	Laurent	PR1	Génie des Procédés	SPIN
PIJOLAT	Christophe	PR 1	Génie des Procédés	SPIN
PIJOLAT	Michèle	PR 1	Génie des Procédés	SPIN
PINOLI	Jean-Charles	PR 1	Image, Vision, Signal	CIS
STOLARZ	Jacques	CR	Sciences & Génie des Matériaux	SMS
SZAFNICKI	Konrad	CR	Sciences & Génie de l'Environnement	DF
THOMAS	Gérard	PR 0	Génie des Procédés	SPIN
VALDIVIESO	François	MA	Sciences & Génie des Matériaux	SMS
VAUTRIN	Alain	PR 0	Mécanique & Ingénierie	SMS
VIRICELLE	Jean-Paul	MR	Génie des procédés	SPIN
WOLSKI	Krzysztof	MR	Sciences & Génie des Matériaux	SMS
XIE	Xiaolan	PR 1	Génie industriel	CIS

Glossaire :

PR 0 Professeur classe exceptionnelle
 PR 1 Professeur 1^{ère} catégorie
 PR 2 Professeur 2^{ème} catégorie
 MA(MDC) Maître assistant
 DR (DR1) Directeur de recherche
 Ing. Ingénieur
 MR(DR2) Maître de recherche
 CR Chargé de recherche
 EC Enseignant-chercheur
 IGM Ingénieur général des mines

Centres :

SMS Sciences des Matériaux et des Structures
 SPIN Sciences des Processus Industriels et Naturels
 SITE Sciences Information et Technologies pour l'Environnement
 G2I Génie Industriel et Informatique
 CMP Centre de Microélectronique de Provence
 CIS Centre Ingénierie et Santé

Dernière mise à jour le : 22 juin 2009

Centre SITE

Sciences, Information
et Technologies
pour l'Environnement

Unité de Recherche ETNA

Erosion Torrentielle
Neige et Avalanches

Remerciements

Pour son auteur, ce travail concerne les risques à double titre. Tout d'abord en raison du domaine d'application passionnant mais aussi finalement encore assez mal connu. Il l'est également en raison d'une certaine prise de risque lié au cadre professionnel dans lequel ce travail a été réalisé. Après une quinzaine d'années de pratique professionnelle dans le domaine du génie civil et des stratégies de protection, la thématique des risques naturels est abordée ici sous une vision pluridisciplinaire en explorant de nouvelles disciplines et domaines scientifiques. La pratique de l'expertise des risques naturels apprend l'humilité et la méfiance vis-à-vis de ses propres certitudes : cette expérience de recherche aura permis de mieux vivre avec ces incertitudes tout en prenant encore plus conscience, si besoin était, de leurs étendues. Au final, comme le déclarait Benjamin Franklin *"il y a bien des manières de ne pas réussir, mais la plus sûre est de ne pas prendre de risques"*.

Au moment de terminer ce travail, je mesure donc le chemin parcouru depuis les premières idées. Malgré son apparence individuelle et solitaire, une thèse est souvent le résultat indirect d'un véritable travail d'équipe. Elle n'aurait pas pu exister sans la contribution et le soutien d'un grand nombre de personnes et d'organismes. Je tiens tout d'abord à remercier la hiérarchie du *Cemagref* pour m'avoir permis d'engager ce travail d'exploration de nouvelles thématiques de recherche au service de l'expertise des risques naturels en montagne. Je remercie également le *MEEDDM/DGPR*¹ qui a soutenu les actions de recherche/développement conduites par le *Cemagref* dans le domaine des systèmes d'information et de l'aide à la décision pour la gestion des risques naturels.

Je remercie également l'ensemble du centre SITE (Sciences, Information et Technologies de l'Environnement) de l'Ecole des Mines de Saint-Etienne (ENSM-SE) et son directeur Didier Graillot pour leur ouverture d'esprit et leur curiosité vis-à-vis de thématiques et domaines nouveaux pour cette équipe. L'école doctorale "Sciences et génie de l'environnement" de l'ENSM-SE, au travers de son responsable, Jacques Bourgois, a joué un rôle essentiel dans ce travail notamment en comprenant les contraintes associées à la réalisation d'un tel travail dans un cadre professionnel.

Je tiens à remercier sincèrement tous les membres du jury qui m'ont fait l'honneur d'accepter de juger ce travail pluridisciplinaire et particulièrement les deux rapporteurs de cette thèse, MM.

1. Ministère de l'Energie, de l'Ecologie, du Développement Durable et de la Mer/ Direction Générale de la Prévention des Risques

Pierre Valin² et Gilles Dusserre³ pour la qualité de leur analyse et de leurs remarques. Je suis également largement reconnaissant aux encadrants de cette thèse, Didier Richard (*Cemagref*), Mireille Batton-Hubert et Didier Graillot (centre SITE, ENSM-SE) qui m'ont guidé dans la réalisation et apporté leur aide et conseils jusqu'aux dernières phases de relecture.

Ce travail intègre une grande partie d'expérience acquise dans le domaine de l'ingénierie des risques naturels et s'est nourri des discussions avec mes collègues à l'intérieur et l'extérieur du *Cemagref*. A l'origine, Roland Burnet, ancien collègue du *Cemagref*, m'avait incité à m'intéresser à l'incertitude. Pierre Dumollard, professeur de géographie à Grenoble a été ensuite le premier à éveiller ma curiosité pour les techniques de fusion d'information dont quelques applications venaient de voir le jour dans le domaine de la géographie. Les collègues et stagiaires de l'équipe Erosion Torrentielle Neige et Avalanches (ETNA) ayant travaillé avec moi, notamment François Rabin, Laure Barral, Ewald Lacroix et Pierre Ravel, ont évidemment contribué à nourrir ma réflexion et mon travail. Enfin, découvrir le domaine de la fusion d'information n'aurait pas été possible sans les contributions essentielles de Jean Dezert qui m'a expliqué les principes de la *DStM* mais aussi de Pascal Djiknavorian et Arnaud Martin qui ont mis à ma disposition les routines de calcul permettant de procéder à la mise en œuvre effective des phases de calcul ...

Enfin, j'ai aussi évidemment une pensée particulière pour toute ma petite famille qui m'a soutenu et qui s'est souvent demandé ce qu'un ordinateur pouvait avoir de plus qu'une plage ensoleillée ou une piste de ski ...

2. Professeur des universités de Laval et de Mac Master, Canada

3. Directeur de recherche, Ecole des Mines d'Alès

Résumé

Les phénomènes naturels gravitaires rapides tels que les avalanches ou les crues torrentielles constituent une menace importante pour les biens et les personnes en zones de montagne mais restent mal connus. Pour assurer la sécurité et préserver la vie économique, l'identification et la réduction du risque sont des objectifs majeurs de l'Etat, des collectivités locales et de leurs équipes techniques. Déterminer, évaluer et localiser les priorités d'intervention constituent autant de décisions devant intégrer les contraintes non seulement techniques, économiques, sociales mais aussi environnementales. Dans un contexte de connaissance partielle et imparfaite de l'occurrence et de la physique des phénomènes, l'expertise contribue, par des approches pluridisciplinaires à la fois qualitatives et quantitatives, à identifier les phénomènes, analyser les risques qu'ils induisent sur les enjeux et proposer des mesures structurelles et/ou non-structurelles pour la réduction des risques. Les jugements d'experts dépendent de la disponibilité, de la qualité et de l'incertitude de l'information disponible en provenance de mesures, d'enquêtes historiques, de témoignages mais aussi d'analyses personnelles pouvant être subjectives, contradictoires faites par les experts eux-mêmes. En fin de compte, les scénarios de phénomènes et les décisions peuvent ainsi reposer sur des informations incertaines et contradictoires sans qu'il soit possible de vraiment identifier la part du vrai, de l'imprécis, du contradictoire ou simplement de l'inconnu dans les hypothèses ayant conduit au résultat.

Dans ce contexte, ce travail analyse les relations entre l'information au travers de ses différentes formes d'imperfection telle que l'incertitude avec la décision dans la perspective de son intégration dans des systèmes d'information. Il vise d'une part à améliorer la traçabilité, l'explicitation et la qualité des composants du processus d'expertise et, d'autre part, à fournir et analyser des outils d'aide multicritères à la décision capables de considérer l'information imparfaite (incertaine, imprécise) provenant de sources de fiabilité variable et potentiellement conflictuelles.

Dans un premier temps, l'analyse porte à la fois sur la capacité des méthodes d'aide multicritères à la décision à produire une analyse ou une évaluation des composantes du risque et sur le diagnostic de méthodes existantes parfois développées de manière empirique. Une méthodologie est proposée pour transformer ces modèles existants correspondants à des listes de critères (donc sans notion de hiérarchie) en véritables modèles de décision hiérarchiques. Ceci permet notamment d'explicitier plus clairement les préférences relatives choisies par les analystes pour comparer les critères individuels ou regroupés dans des critères de synthèse. Sur cette base, un modèle hiérarchique quelconque peut ainsi être transformé dans un autre modèle du même type tout en conservant le même résultat global. Cette reconfiguration permet par contre de mettre en évidence des vues différentes et nouvelles des préférences entre critères liées par exemple à l'importance et au rôle de scénarios basés sur une aggravation de critères dans la décision.

Dans un second temps, la méthodologie *ER-MCDA* associant la fusion d'information et l'aide multicritères à la décision permet de combiner des critères qualitatifs et quantitatifs évalués de manière incertaine, imprécise par des sources plus ou moins fiables et conflictuelles. L'aide multicritères hiérarchique à la décision (*AHP*) permet de formuler conceptuellement le problème de décision mais aussi d'explicitier les préférences entre les critères. Les théories des ensembles flous et des possibilités sont utilisées pour transformer des critères quantitatifs et qualitatifs dans un cadre de discernement commun associé à la décision et à la théorie des fonctions de croyance via d'une part, la théorie de *Dempster-Shafer* (*DST*) et, d'autre part, la théorie de *Dezert-Smarandache* (*DSmT*). Dans ce contexte, la théorie *DSmT* présente l'avantage de pouvoir modéliser de manière native et naturelle des informations vagues, imprécises et conflictuelles. A titre d'exemple, des informations incertaines et imparfaites sont fusionnées pour identifier la sensibilité d'un site d'avalanche au travers d'une évaluation des composantes du risque. Ce problème simplifié de classement de sites avalancheux montre comment la méthode d'aide mul-

ticritères hiérarchique à la décision et la fusion d'information peuvent être combinées pour faire apparaître la qualité et l'imperfection de l'information dans la décision. Cette méthodologie peut être étendue à des applications spatiales telles que le zonage des aléas et des risques résultant d'une évaluation de nombreuses sources à la fois qualitatives et quantitatives. Cette association de la fusion d'information et l'aide multi-critères à la décision soulève un certain nombre de verrous tels que l'explicitation et la définition (subjective) des masses de croyance, la prise en compte du conflit, le choix des règles et la définition du processus de fusion, la validation des résultats mais aussi, de manière plus spécifique, la nécessité de prendre en compte de manière différenciée l'importance et l'incertitude dans le processus de fusion.

Finalement, l'aide multicritères à la décision peut être vue comme une alternative pour l'évaluation des composantes du risque. La traçabilité des critères est caractérisée au travers de méthodologies accessibles (formulation hiérarchique, nombres flous) et de la description de l'imperfection de l'information. Elle peut ainsi être vue non seulement comme un moyen d'améliorer la qualité globale de l'expertise et du processus de décision mais aussi comme créatrice d'un nouvel espace d'interaction entre l'expertise et les décideurs publics. Au-delà d'un strict intérêt technique, ces méthodes pourraient bien apparaître comme des soutiens aussi inattendus que pertinents dans le cadre d'approches intégrées de la gestion du risque.

Mots-clés : risques naturels, avalanches, crues torrentielles, gestion intégrée du risque, expertise, incertitude, imperfection, systèmes d'information, décision, fusion d'information, théorie des fonctions de croyance, théorie des ensembles flous, théorie des possibilités, théorie de *Dempster-Shafer* (*DST*), théorie de *Dezert-Smarandache* (*DSmT*), aide multi-critères à la décision, aide multi-critères hiérarchique (*AHP*).

Abstract

Rapid mass movements hazards such as mountain rivers (torrents) and snow avalanches put humans and material assets at risk with dramatic consequences. Risk reduction is reached through structural and non-structural measures such as zoning control, preventive information. In a context of lacking knowledge about the natural phenomena, expertise is required to provide analyses for decision and risk management purposes using multi-disciplinary quantitative or qualitative approaches. Expert judgements depend on the availability, quality and uncertainty of the available information that may result from measures, historical analysis, testimonies but also subjective, possibly conflicting, assessments done by the experts themselves. At the end, phenomenon scenarios and decisions may very well rely on very uncertain and conflicting information without being able to really know what was completely true, imprecise, conflicting or simply unknown in the hypotheses leading to the result. At the same moment, traceability and shared decision-aid tools are expected from the stakeholders for better understanding and use of expertise results in an integrated risk management framework able to consider both technical, environmental and social aspects of decision.

In that context, this work analyses relations between information and decision including the integration of results in information systems. On one hand, it contributes to improve traceability and quality description of the expertise process and, on the other hand, it provides and analyzes multi-criteria aid-decision tools able to consider information imperfection (uncertainty, imprecision) resulting from conflicting sources.

Firstly, we analyze the ability of multi-criteria decision analysis to help risk assessment, including a diagnosis of existing empirical approaches developed to combine the risk components evaluations. A methodology is proposed to transform those existing models mainly related to lists of criteria (one-level hierarchy, meaning no hierarchy) in real hierarchical decision models. This allows to elicit in a clearer way the relative preferences chosen by the analysts between individual or grouped criteria. On this basis, any hierarchical model can be transformed in an another one, keeping the same decision results and highlighting some new preferences views on the problem such as role and importance of scenarios based on aggravated criteria in the decision.

Secondly, a framework mixing evidential reasoning and multi-criteria decision analysis (*ER-MCDA*) combines qualitative and quantitative criteria on which more or less reliable and conflicting sources provide uncertain and imprecise evaluations. The Analytic Hierarchy Process (*AHP*) is used both to model the problem in a conceptual way and to elicit preferences between key criteria. Fuzzy Sets and Possibilities theories are used to transform quantitative and qualitative criteria into a common frame for Dempster-Shafer Theory (*DST*) and *Dezert-Smarandache* Theory (*DSmT*). In that context, *DSmT* proposes more valuable modeling principles for vague, imprecise and uncertain information and conflict management. As an example, information fusion allows merging different uncertain and imperfect pieces of information to identify the sensitivity of an avalanche prone area. A simplified decision sorting problem based on a snow-avalanche risk management problem shows how the use of multi-criteria decision analysis principles and information fusion can be used to characterize and take information quality or imperfection into account for decision purposes. This methodology can be extended to spatial applications such as hazard and risk zoning maps. Mixing information fusion and multi-criteria decision points out some important issues such as basic belief assignments elicitation, conflict identification and management, fusion rule choices, validation of results but also specific needs to make a difference between importance and uncertainty in the fusion process.

At the end, multi-criteria decision-aid methods can be viewed as a valuable and alternative support for risk components evaluation. Traceability through easily understandable methodologies (hierarchical approaches, fuzzy numbers) and information imperfection assessments can be viewed not only as ways to improve the global quality of the expertise and decision processes

but also as creating a new space for interaction between expertise and society. In addition to their technical interest, they may become unexpected but valuable support to an integrated risk management approach.

Keywords : natural hazards, integrated risk management, expert judgement, uncertainty, imperfection, information systems, decision, information fusion, Evidence theory, Fuzzy sets theory, Possibility theory, *Dempster-Shafer* theory (*DST*), *Dezert-Smarandache* theory (*DSmT*) multicriteria decision analysis (MCDA), Analytic Hierarchy Process (*AHP*).

Table des matières

Remerciements	4
Résumé	6
Abstract	8
I Risques naturels, expertise et incertitude	15
1 Introduction	16
1.1 L'expertise pour gérer l'incertitude	16
1.1.1 Les enjeux de la gestion des risques naturels	16
1.1.2 Expertise, décision et information imparfaite	16
1.2 Guide de lecture	17
2 Expertise et gestion des risques naturels	21
2.1 Avalanches, crues torrentielles : des phénomènes rapides et destructeurs en montagne	21
2.1.1 Les crues torrentielles, entre liquide et solide	23
2.1.2 Les avalanches de neige	24
2.2 Analyse et gestion du risque	26
2.2.1 Vision sociotechnique du risque : une formulation d'apparence quantitative	26
2.2.2 Réduire le risque	29
2.3 Formes et modalités d'expertise	32
2.3.1 Contexte et méthodes de l'expertise	32
2.3.2 Le dilemme de l'expertise : analyser et agir sans pouvoir tout connaître .	34
2.3.3 L'expertise nécessite et produit des outils d'aide à la décision	41
2.3.4 La nécessité et la réalité des approches qualitatives	46
2.4 L'expertise, un vecteur d'appropriation perfectible	48
2.4.1 Analyser et gérer les risques : l'incertitude au cœur d'une double complexité scientifique et organisationnelle	48
2.4.2 L'incertitude concerne toutes les approches scientifiques, dont l'expertise .	50
2.4.3 L'expertise technique critiquée	51
2.4.4 L'expertise doit répondre à des exigences de traçabilité	52
2.4.5 L'objectif et les enjeux de la gestion intégrée des risques	56
2.5 Synthèse et émergence de la problématique de recherche	60
2.5.1 Le constat et les besoins	60
2.5.2 Objectifs	63
II Etat de l'art : Information et décision	67
3 Information, incertitude, risque et décision	68
3.1 Qualité de l'information	68

TABLE DES MATIÈRES

3.1.1	La valeur de l'information	69
3.1.2	Les formes d'imperfection de l'information	69
3.2	Représenter les processus et l'information	73
3.2.1	Décrire des processus et des scénarios	73
3.2.2	Modéliser et représenter l'information	77
3.2.3	Stocker et tracer l'information	79
3.3	Conclusion partielle	81
4	De la décision à l'aide à la décision	83
4.1	Contexte et processus de décision	84
4.1.1	Notion d'aide à la décision	84
4.1.2	Décision en univers certain, risqué et incertain	85
4.1.3	Les limites de la rationalité et les biais cognitifs de la décision	86
4.1.4	Origine et nature de l'aide multicritères	88
4.2	L'aide multicritères à la décision	89
4.2.1	Méthodologie d'aide multicritères à la décision	89
4.2.2	Classes de méthodes d'aide multicritères à la décision	93
4.2.3	La théorie de l'utilité multi-attribut	94
4.2.4	La méthode multicritères hiérarchique (<i>AHP</i>)	97
4.3	Synthèse partielle sur l'aide multicritères à la décision	105
4.3.1	L'analyse multicritères et l'expertise des risques naturels	105
4.4	Conclusion	106
4.4.1	Principes retenus	106
4.4.2	Deux enjeux de développement	107
5	Les approches théoriques pour l'information imparfaite et paradoxale	109
5.1	Les probabilités	109
5.1.1	Principes de base	110
5.1.2	Les limites des probabilités	110
5.2	La logique floue	111
5.2.1	Théories des ensembles flous	111
5.2.2	Théorie des possibilités	113
5.3	Propager les imperfections	115
5.4	Théorie de l'évidence ou des fonctions de croyances	116
5.4.1	La théorie de Dempster-Shafer (<i>DST</i>)	117
5.4.2	La théorie de Dezert-Smarandache (<i>DSmT</i>)	121
5.5	Fusion d'information et conflit	124
5.5.1	Notion de conflit	125
5.5.2	Règles de fusion pour gérer le conflit	125
5.6	Synthèse : L'intérêt d'une approche complémentaire associant les différentes théories de l'incertain	126
6	Synthèse : vers une nouvelle méthodologie pour la décision et l'expertise	131
6.1	Aide multicritères à la décision et information imparfaite	132
6.1.1	Analyse de sensibilité	132
6.1.2	Intervalles et nombres flous	133
6.1.3	Méthodes indirectes de prise en compte de l'incertitude	133
6.2	Théorie des fonctions de croyance et aide multicritères à la décision	134
6.2.1	Fonctions de croyance et méthodes d'agrégation totale	134
6.2.2	Validité et limites d'une association entre fusion et approches multicritères	135

6.3	Les principes d'une nouvelle méthodologie	137
III Développements méthodologiques : Aide multi-critères à la décision et fusion d'information pour la gestion des risques naturels		139
7	Diagnostic et reconfiguration de modèles de décision hiérarchique	140
7.1	Diagnostic de modèles simples d'agrégation totale	140
7.1.1	Pertinence de l'agrégation additive	140
7.1.2	Premier diagnostic de la méthode "Sites Sensibles Avalanches" (<i>SSA</i>) . .	144
7.1.3	De nouveaux besoins	146
7.2	Vers des modèles de décision hiérarchiques polyvalents	149
7.2.1	Formalisation d'une structure hiérarchique	150
7.2.2	Typologie et normalisation des pondérations	152
7.2.3	Définir des structures hiérarchiques équivalentes	162
7.3	Applications	169
7.3.1	Structuration et reconfiguration hiérarchiques	169
7.3.2	Diagnostic des structures de préférences	173
7.4	Synthèse	176
8	La méthodologie (<i>ER-MCDA</i>) : analyse multicritères et fusion d'information	179
	Introduction	179
8.1	La méthodologie <i>ER-MCDA</i> : du modèle hiérarchique à l'évaluation des critères .	180
8.2	La définition des modèles de décision et de fusion	182
8.2.1	Modèle de décision hiérarchique	183
8.2.2	Un cadre de discernement commun nécessaire pour la fusion	184
8.3	Modèle de Transposition ("Mapping") flou des critères quantitatifs	186
8.3.1	Ensembles flous et possibilités : deux outils pour la transposition vers le cadre de discernement	186
8.3.2	Définition des modèles de transposition quantitatifs	187
8.3.3	Mise en œuvre des modèles de transposition quantitatifs	194
8.4	Modèles de Transposition ("Mapping model") et d'Evaluation ("Scaling model") flous des critères qualitatifs	201
8.4.1	Modèle de Transposition ("Mapping model") qualitatif	201
8.4.2	Construction des modèles d'évaluation ("Scaling model") et de transposition qualitative	203
8.4.3	Processus d'évaluation qualitative	205
8.5	Processus de fusion des avis d'experts et règle de décision	207
8.5.1	Ordre de fusion	207
8.5.2	Facteurs d'affaiblissement différenciés pour l'importance et la fiabilité des sources	210
8.6	Conclusion	218
9	Application de la nouvelle méthodologie <i>ER-MCDA</i>	223
9.1	Modèle simplifié d'analyse de la sensibilité d'un site d'avalanches	223
9.1.1	Description du modèle simplifié d'évaluation de la sensibilité au risque d'avalanche	223
9.1.2	Exemple de résultats détaillés pour un critère quantitatif : $C_{[111]}$	229
9.1.3	Exemple de résultats détaillés pour un critère qualitatif : $C_{[112]}$	236
9.1.4	Critère de décision $C_{[1]}$: résultats de fusion	244
9.1.5	Approche orientée objet pour le développement d'un prototype	250

TABLE DES MATIÈRES

9.1.6 Synthèse	250
9.2 Vers une application spatiale de la méthode <i>ER-MCDA</i> : zonage du risque dans un contexte d'informations imparfaites	252
9.2.1 Dimension spatiale du problème de décision associé au zonage des risques	252
9.2.2 Pixel vs. zones : deux stratégies de modélisation	254
9.2.3 Conclusion sur l'application spatiale	255
IV Discussion - Conclusion	257
10 Discussion	258
10.1 Apports méthodologiques	259
10.1.1 Formulation et reconfiguration hiérarchiques d'un problème de décision .	259
10.1.2 Associer fusion d'information et aide à la décision multicritère hiérarchique	263
10.2 Perspectives méthodologiques	268
10.2.1 Méthodes de reconfiguration et modèles hiérarchiques	268
10.2.2 La méthodologie <i>ER-MCDA</i>	269
10.3 Aspects opérationnels	277
10.3.1 Les apports	277
10.3.2 Les perspectives opérationnelles	279
11 Conclusion	283
11.1 Cadre général	283
11.1.1 La problématique	283
11.1.2 La démarche	284
11.1.3 L'analyse des méthodes existantes	284
11.1.4 Les développements	286
11.2 Les apports	288
11.2.1 Introduire de nouvelles approches pour l'expertise des risques naturels .	288
11.2.2 Structurer, diagnostiquer, reconfigurer des modèles hiérarchiques	289
11.2.3 Associer l'analyse multicritères et la fusion d'information	290
11.3 Les perspectives et axes de développement	292
11.3.1 Les perspectives méthodologiques	292
11.3.2 Les perspectives opérationnelles	294
11.4 L'objectif de la gestion intégrée des risques	296
Bibliographie	299
Table des figures	324
Liste des tableaux	326
Annexes	328
A Abréviations-Symbôles	328
A.1 Domaine thématique des risques naturels	328
A.1.1 Organismes	328
A.1.2 Gestion des risques naturels	328
A.2 Symbôles-notations	329
A.2.1 Modélisation conceptuelle	329

TABLE DES MATIÈRES

A.2.2	Théories de l'incertain	329
A.2.3	Méthodes d'aide multi-critères à la décision	329
A.2.4	Sûreté de fonctionnement	330
B	Les risques naturels : cadre, outils de gestion et sources d'incertitudes	331
B.1	Représentations schématiques de processus d'expertise	331
B.2	Modèle global d'analyse des risques naturels gravitaires rapides	333
B.3	Exemples de stratégies et de mesures structurelles de protection contre les risques torrentiels	335
B.4	Sources d'incertitude et expertise des risques torrentiels	337
C	Imperfection de l'information	339
C.1	Typologie des imperfections de l'information	339
D	Probabilités, biais et subjectivité	341
D.1	Périodes de retour et probabilités sur la durée	341
D.2	Un exemple simple d'estimation du risque	341
D.3	Aversion aux risques dans le cadre de la théorie des perspectives	342
D.4	Exemple de biais cognitifs : l'effet de cadrage et de renversement de préférences	344
D.5	Type de paradoxes	344
E	Aide à la décision	347
E.1	Les méthodes multicritères élémentaires	347
E.1.1	La somme pondérée : la plus élémentaire des méthodes multicritères . . .	347
E.1.2	La multiplication de ratios	347
E.2	Modélisation des préférences	348
E.2.1	Structure et relation de préférences	348
E.2.2	Modèles de préférences en environnement certain, risqué et incertain . . .	348
E.3	Historique des théories de la classique	350
F	Théories pour l'information incertaine et imparfaite	351
F.1	Historique des théories	351
F.2	Théorie des ensembles flous	352
F.2.1	Intervalles et nombres flous type L-R	352
F.2.2	Propositions floues	354
F.3	Théories des fonctions de croyance	355
F.3.1	Exemple de calculs de fusion	355
F.3.2	Règles de fusion	357
F.3.3	Méthodologie de mise en œuvre de la théorie <i>DSmT</i>	360
F.4	Théorie des probabilités - Définitions de base	360
G	Reconfiguration de modèles de décision hiérarchique	363
G.1	Modèles et principe de normalisation	363
G.1.1	Implémentation et notations des modèles de normalisation	363
G.1.2	Cas simplifié d'application numérique	369
G.2	Modèle exemple 1	371
G.3	Modèle exemple 2	371
H	Modèles hiérarchiques : Sites Sensibles Avalanches (<i>SSA</i>)	379
H.1	Sites sensibles avalanches - Configuration actuelle	379
H.2	Sites sensibles avalanches - Evolution par scénarios	384

TABLE DES MATIÈRES

I	Méthodologie <i>ER-MCDA</i> : compléments de résultats	389
I.1	Evaluation et modèle de transposition	389
I.1.1	Critère Morphologie $C_{[121]}$	389
I.1.2	Critère Histoire $C_{[122]}$	390
I.1.3	Critère Nivo-climatologie $C_{[123]}$	390
I.1.4	Exemple de résultats	391
I.2	Description des processus de fusion	392
I.2.1	Processus basés sur un cadre DST	393
I.2.2	Processus basés sur un cadre $DSmT$	394
I.3	Développement d'un prototype	395
I.3.1	Structures de données	396
I.3.2	Routines de calcul	397

Première partie

Risques naturels, expertise et incertitude

Chapitre 1

Introduction

1.1 L'expertise pour gérer l'incertitude

1.1.1 Les enjeux de la gestion des risques naturels

Dans toutes les zones de montagne et en France en particulier, les crues torrentielles, les mouvements de terrain et les avalanches constituent les principaux phénomènes naturels générateurs de danger.

Pour réduire les risques sur les enjeux tels que les populations, infrastructures et activités menacées par ces phénomènes soudains et brutaux, différentes stratégies de prévention, d'alerte et de gestion de crise sont mises en œuvre. La gestion des risques naturels se fait toujours dans un environnement incertain lié non seulement à leur fréquence d'occurrence mais aussi à la connaissance partielle des mécanismes et contextes physiques de déclenchement, de propagation et d'interaction avec les enjeux. Dans ce cadre, l'expertise est mobilisée pour analyser les phénomènes, évaluer les risques, proposer des solutions opérationnelles et plus généralement aider les collectivités et l'Etat, responsables de la sécurité publique, à décider, choisir et classer les meilleures stratégies. Définir les zones géographiques prioritaires, arbitrer entre les différentes stratégies de prévention, gérer et entretenir les ouvrages de protection, contrôler l'occupation du sol, prendre des mesures d'urgence... constituent quelques-unes des décisions complexes auxquelles ces acteurs publics sont confrontés. Dans le même temps, la traçabilité et l'explicitation des décisions deviennent des enjeux majeurs pour permettre l'appropriation des mesures par la population et développer une véritable conscience du risque. Les mesures de prévention et de protection sont en effet encore souvent jugées et critiquées en raison de leurs conséquences économiques, environnementales et sociales et du caractère d'apparence arbitraire et non discutable des études les justifiant. En cas de catastrophes, la société au travers de la justice est également amenée à évaluer et se prononcer sur la pertinence des avis rendus et sur l'adéquation des mesures de gestion.

En tant que support d'aide à la décision, les attentes et les enjeux associés à l'expertise des risques naturels sont donc considérables. Dans un contexte de forte incertitude, comment l'imperfection de l'information affecte-t-elle la décision ? comment aider à prendre la "meilleure" décision de gestion ? comment expliquer son raisonnement et faire connaître, expliciter l'incertitude ? comment faire de cette démarche un moyen d'amélioration de la qualité de l'expertise et d'intégration de la gestion des risques naturels ?

1.1.2 Expertise, décision et information imparfaite

Dans le domaine de l'expertise des risques naturels, les progrès méthodologiques concernent souvent l'analyse et la connaissance des phénomènes. Les phénomènes restent mal connus et les

connaissances et les méthodes restent imparfaites. L'expertise constitue elle-même un processus de décision peu décrit, palliant les imperfections de l'information pour caractériser et combiner les composantes du risque associées à la caractérisation du phénomène et, d'autre part, aux enjeux exposés. L'information utilisée, de nature quantitative ou qualitative, provient de sources hétérogènes, parfois conflictuelles et de fiabilité variable.

De nombreux travaux ont été conduits sur chacun des volets relatifs soit à la manipulation de l'information imparfaite, à l'explicitation du raisonnement humain ou enfin à la décision en univers certain, risqué ou incertain principalement dans le cadre de la théorie des probabilités. Peu d'approches concernent le domaine des risques naturels. Dans le même temps, les méthodologies utilisées dans la gestion des risques naturels en montagne utilisent peu, du moins de manière explicite, les méthodes d'aide à la décision. Avec l'objectif de contribuer à l'objectif d'une gestion intégrée des risques naturels, la recherche vise à capitaliser les connaissances, expliciter et améliorer les processus de décision associés à l'expertise des risques naturels en lien avec l'imperfection de l'information utilisée pour décider. Le travail repose essentiellement sur l'utilisation conjointe de méthodes d'aide multicritères à la décision, de théories de représentation de l'information imparfaite et de la fusion d'information.

1.2 Guide de lecture

Le travail est organisé selon un cheminement allant de l'identification de la problématique jusqu'à la proposition de méthodologies d'aide à la décision dans un contexte d'informations imparfaites. Le document comprend quatre parties (FIG. 1.1).

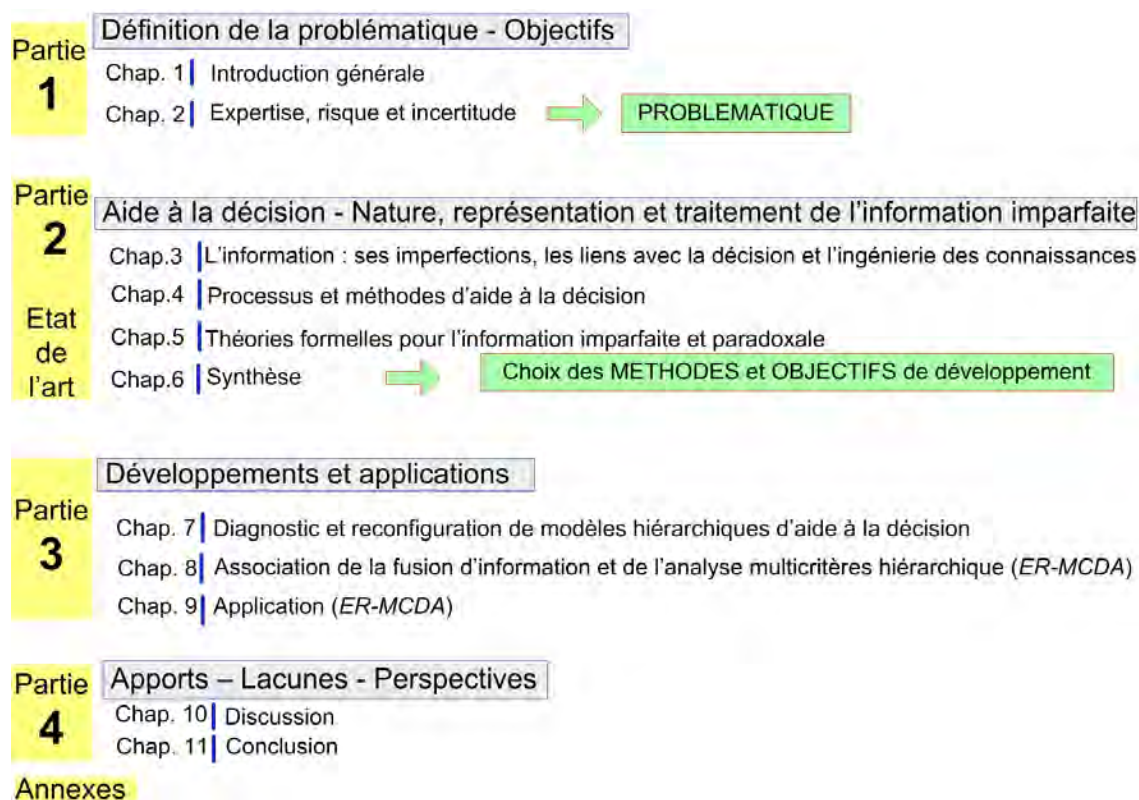


FIGURE 1.1 – Plan de la thèse

Leur contenu correspond respectivement à :

- la description de l’expertise dans le contexte global de la gestion des risques sur la base d’exemples de type avalanches et crues torrentielles ;
- l’analyse de l’état de l’art relatif aux méthodes d’aide à la décision en présence de critères multiples, à la représentation et au traitement de l’information imparfaite ;
- la proposition de méthodologies pour, d’une part, le diagnostic et la construction de modèles d’aide à la décision dans le domaine des risques naturels et, d’autre part, l’association entre les approches multicritères et la fusion d’information ;
- la discussion des résultats analysant les apports, lacunes et perspectives d’un point de vue méthodologique et opérationnel et la conclusion générale.

Partie 1 - Risques naturels, expertise et décision

Après une présentation du contexte des risques naturels gravitaires et de leur gestion, cette partie décrit la nature et les difficultés de l’expertise notamment en raison du caractère imparfait, incertain des informations manipulées. L’expertise, mise en œuvre en vue de décision de gestion, est elle-même analysée comme un processus de décision basé sur des informations quantitatives et qualitatives, de natures hétérogènes et incertaines et provenant de sources inégalement fiables et potentiellement conflictuelles. La traçabilité et l’explicitation des raisonnements apparaissent comme des exigences des utilisateurs et de la société. L’objectif du travail est donc de développer un cadre d’aide à la décision capable de décrire les composantes du raisonnement de l’expert et de prendre en compte l’imperfection et l’hétérogénéité de l’information en lien avec la diversité des sources.

Le chapitre 1 correspond à la présente introduction générale.

Le chapitre 2 décrit le contexte de la prévention des risques naturels gravitaires rapides en s’intéressant particulièrement à la nature et aux modes de prise en compte de l’incertitude dans le processus d’expertise :

- Quelles sont les caractéristiques des phénomènes étudiés ? En quoi sont-ils mal connus ?
- Pourquoi a-t-on besoin d’une expertise pour prendre des décisions dans le cadre de la gestion préventive des risques naturels ?
- Quelles sont les attentes et critiques exprimées vis-à-vis de l’expertise ? Comment l’incertitude est-elle prise en compte ?

Cette partie conclut sur l’assimilation de l’expertise à un processus de décision et introduit les domaines auxquels la problématique se réfère, à savoir :

- les formes d’imperfection de l’information telle que l’incertitude ;
- les liens entre l’information et la décision, les méthodes de modélisation conceptuelle de l’information ;
- l’aide à la décision, ses méthodes et ses cadres d’application ;
- les théories formelles de manipulation de l’information imparfaite.

Partie 2 - Etat de l’art : Information et décision

La seconde partie constitue un état de l’art relatif à la prise en compte de l’incertitude et à l’apport des méthodes existantes en matière d’aide à la décision. Elle propose un état de l’art sur les méthodes existantes dans les domaines de la formalisation des raisonnements et processus, de l’aide multicritères à la décision et des théories formelles de l’incertain (théories des probabilités, des ensembles flous, des possibilités et des fonctions de croyance). Cette partie conclut sur l’analyse des tentatives existantes d’association d’approches multicritères d’aide à la décision et les théories de l’incertain avant de proposer les objectifs d’un nouveau développement méthodologique.

Le chapitre 3 décrit les liens entre l'information, ses différentes formes d'imperfection et la décision. Les méthodes de modélisation conceptuelle de l'information permettant de représenter les concepts et leurs relations sont décrits dans la perspective d'une intégration et d'une exploitation des résultats dans le cadre de systèmes d'information.

Le chapitre 4 correspond à la description des principes, théories et méthodes d'aide à la décision. Après un rappel de la théorie classique de la décision rationnelle et des cadres de décision en univers certain, risqué et incertain, il introduit les différentes méthodes d'aide multicritères à la décision, les problématiques de décision auxquelles elles répondent et les différentes méthodes d'agrégation totale et partielle.

Le chapitre 5 présente et compare les différents cadres théoriques formels utilisables pour représenter et traiter les informations hétérogènes, vagues et incertaines dans un cadre décisionnel : théories des probabilités, des ensembles flous, des possibilités et des fonctions de croyance dans le contexte de la théorie de *Dempster-Shafer* (*DST*) et de *Dezert-Smarandache* (*DSmT*).

Le chapitre 6 analyse, à titre d'une première synthèse, la contribution possible des méthodes d'aide multicritères à la décision et des théories formelles de l'incertain dans le cadre de notre problématique. Une synthèse des travaux relatifs à la prise en compte de l'incertitude dans les méthodes d'aide multicritères à la décision au niveau des évaluations de critères, de l'expression des préférences présente et justifie les méthodes mises en œuvre dans les développements méthodologiques.

Partie 3 - Développements méthodologiques : Analyse multicritères et fusion d'information

La troisième partie correspond aux développements méthodologiques dans deux optiques :

- le diagnostic et la reconfiguration hiérarchiques de structures de décision multicritères ;
- l'association de méthodes d'analyse multicritères et de la fusion d'information pour décider en prenant en compte des informations hétérogènes et imparfaites provenant de sources plus ou moins fiables et conflictuelles.

Le chapitre 7 propose une méthode de diagnostic et de reconfiguration de structures hiérarchiques. A partir d'un problème multicritères formulé comme une série de critères non hiérarchisés (*à plat*), la restructuration hiérarchique permet, dans le cadre d'un modèle dit *critère-estimateur-solution* de regrouper les critères selon de nouveaux critères englobants et d'exprimer leurs poids relatifs en ayant recours à différentes méthodes de normalisation. Une méthode de reconfiguration hiérarchique permet ensuite de transformer cette structure hiérarchique sous une autre forme. Les méthodes d'agrégation sont discutées par rapport aux cadres de décision rencontrés dans le domaine de l'expertise des risques naturels.

Le chapitre 8 décrit la méthodologie dénommée *ER – MCDA*¹. Cette méthodologie permet d'évaluer une alternative (en vue de prendre une décision) en prenant en compte l'importance relative des critères, la nature imparfaite et incertaine des informations et la fiabilité des sources. Elle associe un principe de décomposition analytique multicritères et les théories formelles permettant de manipuler l'information imprécise, incertaine et conflictuelle. L'analyse multicritères hiérarchique (*AHP*) sert de support conceptuel pour formaliser le problème de décision et caractériser les importances relatives des critères. Les théories des ensembles flous,

1. Evidential Reasoning - MultiCriteria Decision Analysis

des possibilités et des fonctions de croyance (théorie de *Dempster-Shafer* ou *DST*, théorie de *Dezert-Smarandache* ou *DSmT*) sont utilisées pour déterminer les classes d'appartenance d'une alternative à une classe d'évaluation donnée.

Le chapitre 9 correspond à l'application de la méthodologie *ER-MCDA* sur un problème simplifié de caractérisation de la sensibilité d'un site au risque d'avalanche.

Partie 4 - Discussion - Conclusion

La partie 4 regroupe la discussion, d'un point de vue méthodologique et opérationnel, relative aux apports, lacunes et perspectives associés aux développements méthodologiques. La conclusion propose un bilan général du travail de thèse.

Le chapitre 10 correspond à la discussion des développements en analysant les apports, les lacunes mises en correspondance avec des perspectives d'amélioration sous deux angles méthodologique et opérationnel. La reconfiguration hiérarchique et la méthodologie *ER-MCDA* sont ainsi envisagées et analysées successivement.

Le chapitre 11 constitue la conclusion générale résumant l'ensemble des travaux et développant les perspectives dans un cadre plus global de gestion des risques.

Annexes

Les annexes constituent des compléments d'éléments décrits dans le texte principal et/ou des résultats détaillés principalement sous forme de schémas.

Chapitre 2

Expertise et gestion des risques naturels

Introduction

Après une présentation des phénomènes et de leurs conséquences, ce chapitre décrit les composantes du risque et le cadre de gestion dans lequel l'expertise est mise en œuvre. Il présente ensuite les conditions et lacunes de réalisation de l'expertise. Malgré la connaissance partielle des phénomènes et l'absence fréquente de données, l'expert doit cependant proposer des éléments de solutions en composant dans un contexte de forte incertitude liée notamment à l'imperfection de l'information disponible. Située à l'interface entre la science, la technique et la société, cette expertise technique doit dans le même temps mieux prendre en compte des objectifs techniques mais également sociaux et environnementaux. Sans outrepasser son rôle, l'expertise technique apporte une contribution essentielle dans l'appropriation du risque par la société.

Pour améliorer la qualité intrinsèque de la démarche d'expertise et mieux l'insérer dans un processus global intégré de gestion du risque, l'explicitation du raisonnement de l'expert et le développement d'outils d'aide à la décision sont introduits comme pistes de développement et support de la problématique de recherche.

2.1 Avalanches, crues torrentielles : des phénomènes rapides et destructeurs en montagne

Les avalanches de neige et les crues torrentielles sont des phénomènes naturels rapides en montagne caractérisés par la mise en mouvement rapide de mélanges complexes de fluides (air, eau) et de solides (blocs, graviers, particules fines, débris végétaux) dont les lois et le comportement physiques restent encore très mal connus. De par la nature des processus physiques mis en jeu, ils partagent un certain nombre de caractéristiques communes. Leur brutalité et leur soudaineté laissent peu de temps, de l'ordre de quelques minutes tout au plus pour les avalanches et de quelques dizaines de minutes pour les laves torrentielles, entre le déclenchement et l'impact avec les enjeux : ne pas s'exposer devient une nécessité. Le temps de réaction pour évacuer une zone menacée ou trouver refuge sera toujours trop court et l'alerte restera inefficace dans la plupart des cas. La vitesse et les masses de matériaux mises en mouvement en font des phénomènes violents et destructeurs (FIG. 2.1).



FIGURE 2.1 – Exemples de phénomènes de crues torrentielles et d’avalanches et de leurs conséquences

Ces phénomènes sont dus à la gravité et se propagent du haut vers le bas (ou de l’amont vers l’aval) avec le même enchaînement temporel. Les zones de déclenchement surplombent les zones de propagation qui elles-mêmes sont en amont des zones d’arrêt et d’interaction avec les enjeux majoritairement implantés dans les vallées (FIG. 2.2).

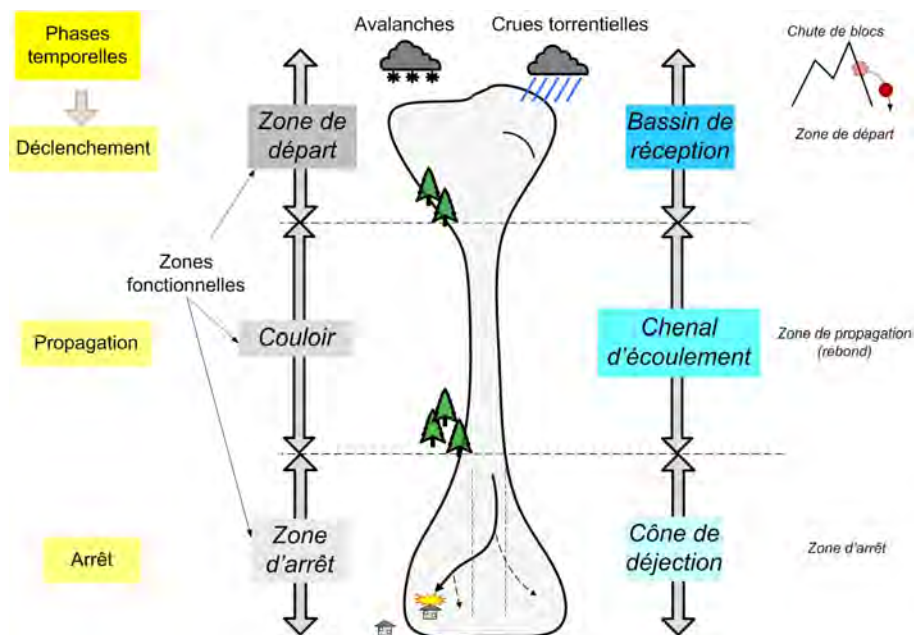


FIGURE 2.2 – Analogie des zones fonctionnelles et phases temporelles des phénomènes gravitaires rapides

Les processus influençant le déclenchement, la propagation sont régis par des facteurs pseudo-permanents (la topographie, la morphologie des sites), des facteurs déclenchants (d’origine na-

2.1. AVALANCHES, CRUES TORRENTIELLES : DES PHÉNOMÈNES RAPIDES ET DESTRUCTEURS EN MONTAGNE

turelle tels que les événements météorologiques ou anthropiques par apport de liquide) et des facteurs aggravants (la présence d'embâcles, de débris végétaux ...).

2.1.1 Les crues torrentielles, entre liquide et solide

Les torrents sont des cours d'eau de montagne dont la pente longitudinale est forte (valeur supérieure à 6%) par opposition aux rivières torrentielles (pentes entre 1% et 6%) et rivières de plaines (pente inférieure à 1%). La partie sommitale du bassin versant constitue le bassin de réception soumis en montagne à des précipitations violentes et orageuses. L'eau s'écoule d'abord par ruissellement sur les versants érodant les matériaux les plus fins, se concentre en ravines convergeant vers le chenal d'écoulement. L'eau accélérée par la pente va entraîner les matériaux solides, des particules les plus fines à des blocs rocheux de grande taille en incisant le lit et les berges, déstabilisant les berges et accélérant encore l'apport en matériaux : l'eau devient très chargée en sédiments, augmentant toujours sa puissance érosive avant de déboucher à forte vitesse sur la partie aval du bassin versant, le cône de déjection où la pente plus faible va entraîner un dépôt des matériaux et provoquer des débordements. Cette partie plus plate du bassin versant, où le torrent rejoint la vallée constitue aussi la zone où les populations habitant les montagnes se sont préférentiellement installées (FIG. 2.3). Avec des surfaces de bassins versants de quelques *ha* à quelques dizaines de *km*², les crues torrentielles peuvent ainsi provoquer des dépôts allant jusqu'à plusieurs centaines de milliers de *m*³, le tout dans un intervalle de temps très court dû à la forte vitesse de l'eau et à la faible distance entre le sommet et l'aval du bassin versant.

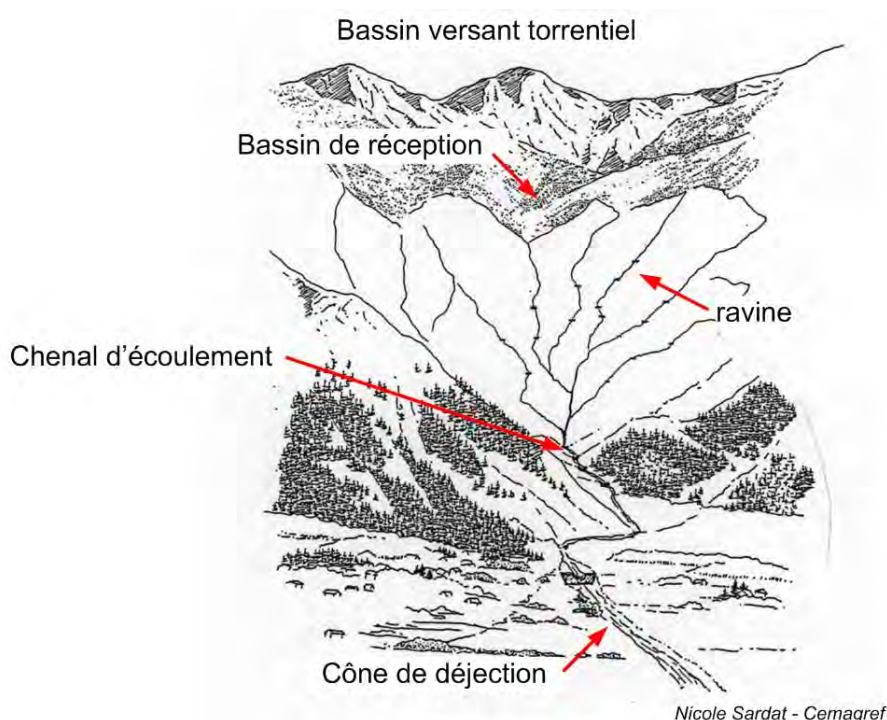


FIGURE 2.3 – Bassin versant torrentiel schématique

Alors que les rivières transportent essentiellement des matériaux très fins allant jusqu'à des particules en suspension, les torrents vont pouvoir entraîner des blocs allant jusqu'à plusieurs tonnes. Deux principaux types d'écoulement et de crues torrentielles sont distingués (Meunier, 1991) (FIG. 2.4) :

- le charriage torrentiel correspond à un écoulement de particules et de blocs dont la taille

maximale correspond environ à la hauteur d'écoulement. Les blocs se déplacent par roulement ou saltation sur le fond dans un écoulement biphasique où l'eau et les solides ont des vitesses différentes. La concentration solide volumique est inférieure à 30% ;

- les laves torrentielles correspondent à un écoulement en masse prenant la forme de bouffées successives se propageant sur quelques mètres de hauteur à des vitesses de quelques m/s . Les blocs et le fluide boueux vont à la même vitesse dans un écoulement d'apparence monophasique dont la densité est voisine de 2. Les bouffées de lave torrentielles sont précédées d'un front souvent formé des plus gros blocs. Les quantités de matériaux et la taille des blocs qu'elles transportent en font les phénomènes torrentiels les plus destructeurs : les volumes considérables se répandent sur les cônes de déjections, ensevelissent les enjeux et les blocs se déplaçant à forte vitesse détruisent facilement toute construction courante.

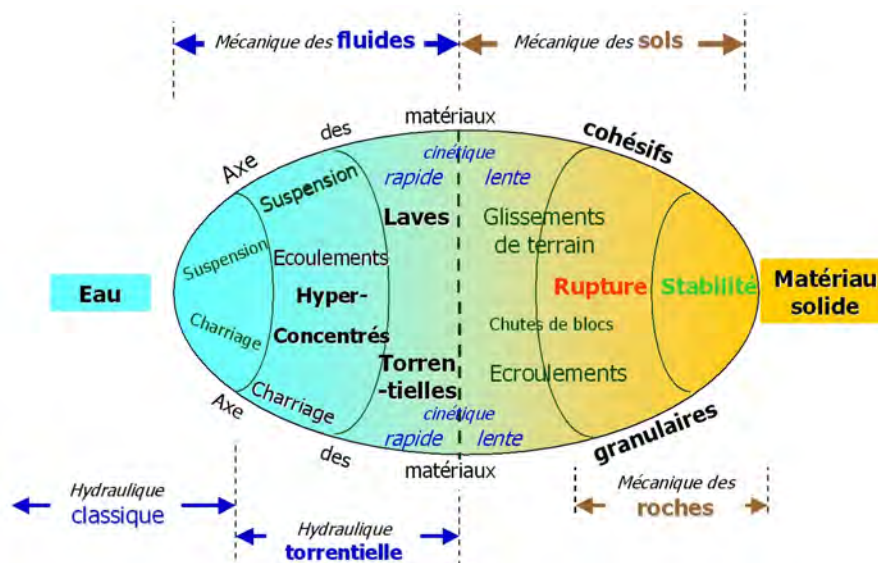


FIGURE 2.4 – Phénomènes torrentiels et disciplines scientifiques (d'après (Meunier, 1991))

L'expertise des risques torrentiels vise à déterminer les apports liquides, identifier, localiser et quantifier les apports en matériaux solides, analyser leurs transports et caractériser les conséquences sur les enjeux.

2.1.2 Les avalanches de neige

Les avalanches de neige correspondent à un écoulement rapide d'une masse de neige sous l'effet de la gravité suite à une rupture d'équilibre dans le manteau neigeux pouvant être naturelle ou accidentelle (skieur). Les avalanches peuvent être classées en fonction du type de neige (avalanche de neige poudreuse, humide), de départ (plaque) ou de saison (avalanche de printemps), ces caractéristiques étant souvent liées les unes aux autres. La distinction la plus importante concerne le type d'écoulement de l'avalanche caractérisé par sa vitesse, la masse volumique de la neige et le régime d'écoulement :

- l'écoulement dense correspondant à une avalanche coulante correspond à un écoulement qui suit les couloirs naturels avec une vitesse de l'ordre de 20 à 30 m/s et une densité de l'ordre de 150 à 450 kg/m^3 ;
- l'écoulement aérosol est un mélange à faible densité (de l'ordre de 2 à 5 kg/m^3 très turbulent d'air et de neige prenant l'aspect d'un nuage se développant sur des hauteurs pouvant aller jusqu'à 100 m et s'écoulant à grande vitesse jusqu'à 100 m/s pour les avalanches majeures. Ces avalanches n'apparaissent qu'avec de la neige froide, sèche, faiblement cohésive

2.1. AVALANCHES, CRUES TORRENTIELLES : DES PHÉNOMÈNES RAPIDES ET DESTRUCTEURS EN MONTAGNE

sur des pentes très fortes.

Des formes mixtes sont souvent observées avec une zone ressemblant à un aérosol précédant et surmontant une couche de neige plus dense. Les avalanches provoquent des dégâts importants liés à la densité pour les avalanches de neige dense alors que c'est l'effet de souffle et la turbulence qui s'avèrent destructeurs pour les avalanches aérosol. Les pressions exercées par les avalanches sont assez mal connues mais des valeurs allant de 500 kPa^1 à 1400 kPa peuvent être observées pour les avalanches majeures (Ancey, 2006). En France, 570 communes sont exposées au risque d'avalanche et la dernière avalanche la plus meurtrière est celle qui a mortellement touché 12 personnes en février 1999 dans le hameau de MontRoc à Chamonix (Haute-Savoie, France).

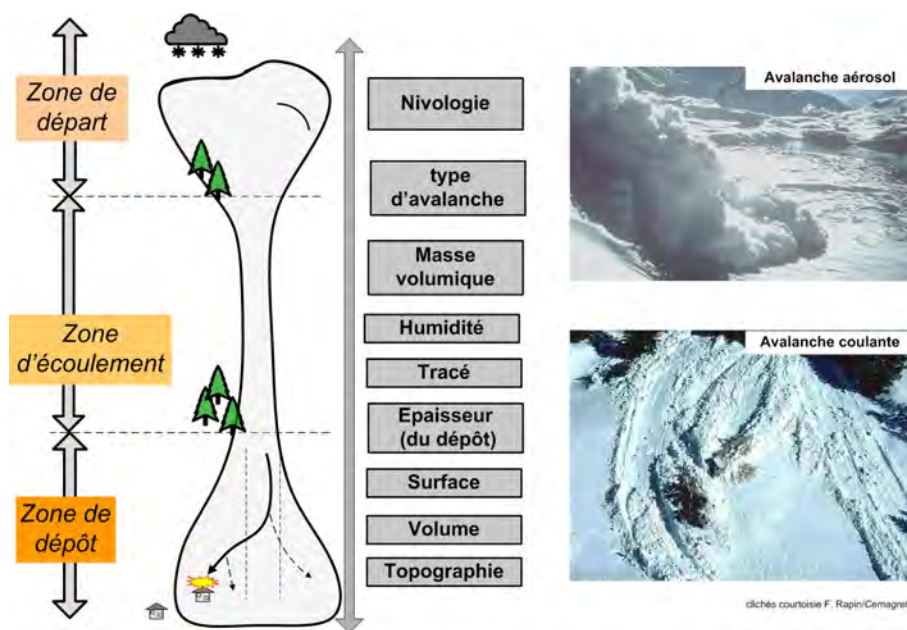


FIGURE 2.5 – Exemple de types et caractéristiques d'avalanche de neige

La meilleure des protections consiste à éviter de se trouver dans la zone de l'avalanche et c'est l'objet des mesures de zonage réglementant l'occupation du sol. En complément, des mesures de protection active, passive ou temporaire peuvent être mises en œuvre :

- la protection active temporaire vise à déclencher préventivement les avalanches à l'aide d'explosifs (à la main, par câbles, hélicoptère, explosifs à gaz) ;
- la protection active permanente consiste par exemple à stabiliser le manteau neigeux dans la zone de départ par des râteliers ou des filets paravalanches ;
- la protection passive modifie l'écoulement de l'avalanche en tentant de la freiner (tas freineurs, étrave), la dévier (tourne, galerie paravalanche) ou l'arrêter (digue)

Ces phénomènes sont tous susceptibles de causer des dommages aux biens et aux personnes devenant tout d'un coup des *risques naturels*. Les experts sont mobilisés dans un processus technique décisionnel que l'on nomme l'analyse et la gestion du risque pour identifier, quantifier les phénomènes puis aider à définir des stratégies de prévention. Dans un premier temps, notre démarche vise donc à décrire le contexte et les difficultés d'expertise des risques naturels gravitaires rapides sur la base des questionnements suivants :

- Quels sont les concepts de définition des risques naturels ?
- Sur quoi porte l'expertise ? A quoi sert-elle ?
- Quels sont les types et les acteurs des décisions à prendre ? Comment les expertises participent-elles à la construction de la décision ?

1. 10 kPa représentent une pression d'environ 1 t/m^2

- Quelles sont (le cas échéant) les différents types d’incertitude associés à l’expertise ?
- Quelles en sont les sources ? Est-ce que la quantification de l’incertitude associée à l’expertise présente un intérêt ?

2.2 Analyse et gestion du risque

2.2.1 Vision sociotechnique du risque : une formulation d’apparence quantitative

Le concept de risque et ses différentes composantes sont interprétés de manière variable selon les communautés scientifiques (sciences physiques, économie, sciences politiques, sociologie, géographie) et les domaines d’application (risques technologiques, naturels, domestiques ...). Le terme de risque(s) naturel(s) porte en lui-même les sources d’une confusion entre l’objet d’étude constitué par un phénomène naturel induisant un dommage et l’évaluation effective du dommage potentiel généré par le phénomène. En économie, le risque correspond à une perte ou un dommage probabilisé. Dans le domaine des sciences humaines et sociales, le risque se définit plus comme un danger construit notamment au travers de la perception humaine et sociale d’une situation ou d’un contexte (Beck, 1992; Veyret, 2004) sans distinction claire entre le risque et l’incertitude (Reddy, 1996). Ce débat sémantique sur le risque constitue une réelle difficulté dans le cadre d’approches pluridisciplinaires sur la gestion du risque. Nous ne présentons ici que la vision ”sociotechnique”, utilisée classiquement dans le cadre des approches d’ingénierie des risques.

Dans une vision qualifiée de ”sociotechnique” et en se plaçant dans un contexte inspiré du monde industriel de la sûreté de fonctionnement, le risque peut être *analysé* dans le cadre d’un diagramme de *Farmer*² comme une combinaison entre une fréquence et une gravité. La fréquence d’un événement complexe se détermine par combinaison des fréquences des événements élémentaires. La gravité de l’événement complexe n’est pas la combinaison des gravités élémentaires mais la gravité de la conséquence (pouvant être supérieure à la somme des gravités unitaires). La gravité est une notion toute relative dépendant de l’événement mais aussi du point de vue de l’évaluateur. L’équivalence entre des niveaux de risque s’avère, elle aussi, totalement subjective et contextuelle : deux risques correspondant d’une part à une gravité importante et une fréquence faible (rare) et, d’autre part, à une gravité moyenne mais une fréquence importante ne sont pas forcément perçus de la même façon. C’est là où intervient la phase dite d’*évaluation du risque* qui caractérise le modèle de risque accepté par la société (Mortureux, 2001)(FIG. 2.6).

2. du nom de l’expert anglais l’ayant inventé

2.2. ANALYSE ET GESTION DU RISQUE

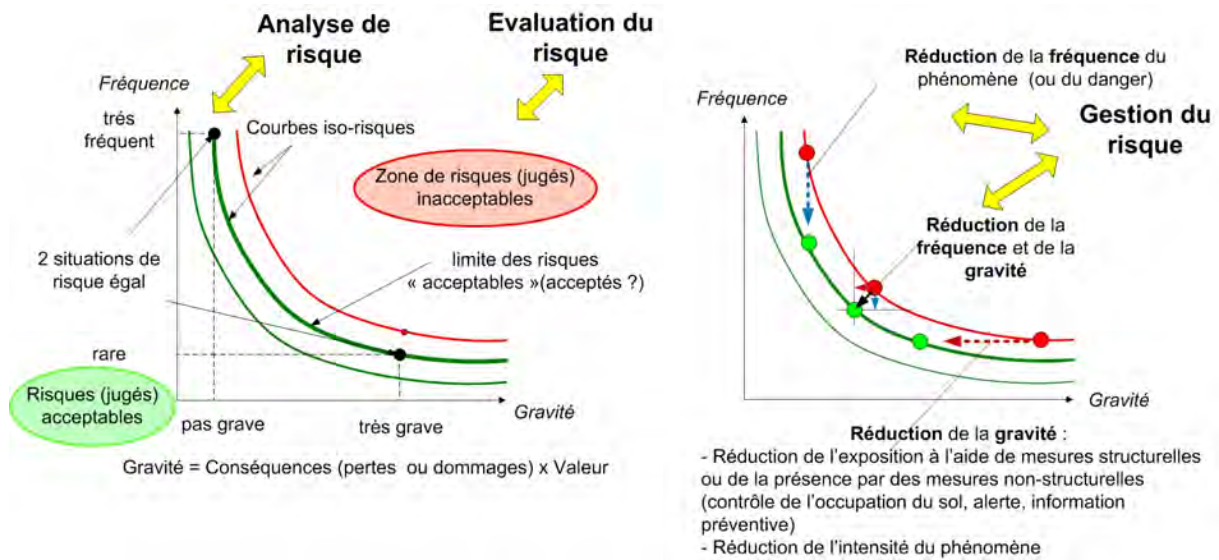


FIGURE 2.6 – Diagramme fréquence-gravité : Risques acceptables, effets de la prévention et de la protection

Dans le domaine des risques naturels, le risque est défini classiquement par une combinaison entre l'*aléa*, combinaison de l'intensité et de la fréquence d'un phénomène et la *vulnérabilité*, caractérisant les dommages potentiels ou la "valeur" de ce qui pourrait être perdu. Les formulations utilisées dans le contexte des risques naturels et de la sûreté de fonctionnement sont en fait deux présentations d'un même concept de risque (FIG. 2.7). Les difficultés de mise en œuvre de ces principes concernent la caractérisation des termes de cette combinaison mais aussi la définition de l'opérateur de "combinaison" ou de "croisement".

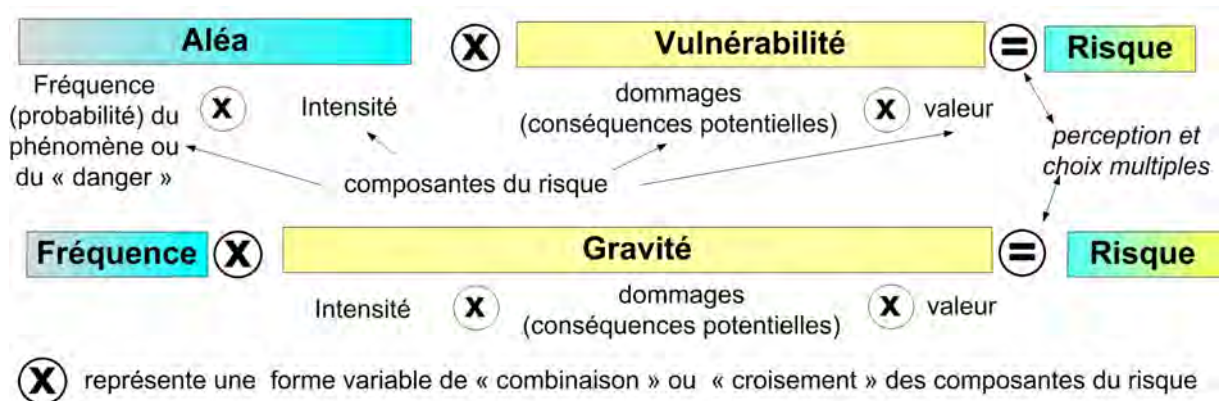


FIGURE 2.7 – Plusieurs présentations pour le même concept de risque

En pratique, le niveau de risque résultant de la combinaison des composantes du risque (gravité et fréquence) prend souvent la forme de croisement de classes qualitatives (FIG. 2.8). La gestion du risque consiste alors à changer de classe de risque en agissant sur ses composantes.

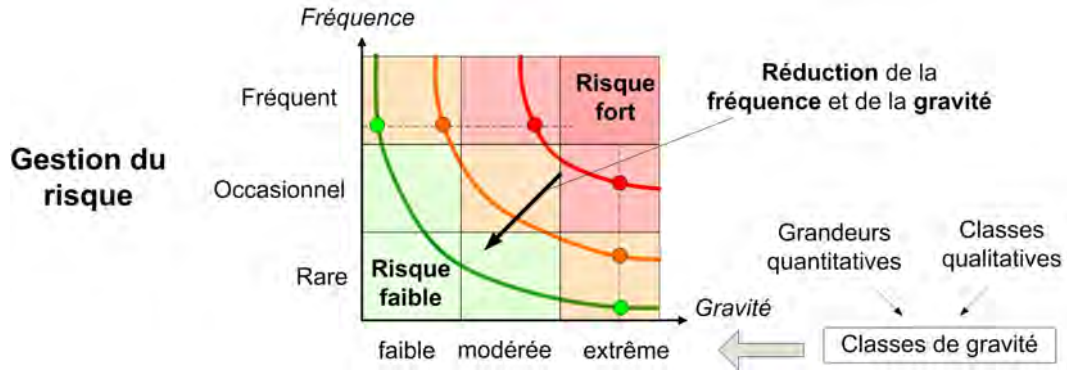


FIGURE 2.8 – Détermination du niveau de risque par combinaison de classes qualitatives

D'autres formulations du risque prennent la forme d'une fonction. Leone (1996) propose, par exemple, une expression du risque correspondant à un phénomène spécifique et noté R_s (avalanche, crue torrentielle ...), défini par (EQ. 2.1) :

$$R_s = f_{risque}(P_o, P_a, P_p) \cdot D \text{ avec } P_o = f_{occurrence}(F_p, P_d) \quad (2.1)$$

avec

P_o : la probabilité d'occurrence du phénomène

F_p : facteurs de prédisposition permanents tels que la morphologie, la nature des matériaux...

P_d : probabilité d'occurrence de facteurs aggravants (phénomènes hydrométéorologiques, actions anthropiques) ou probabilité de déclenchement du phénomène

P_a : la probabilité spatiale pour que le phénomène atteigne l'emplacement de l'élément (ou enjeu) exposé (*exposition*)

P_p : la probabilité temporelle que l'élément (ou enjeu) soit présent au moment où le phénomène arrive (*présence*)

D : le niveau d'endommagement potentiel de l'élément exposé si le phénomène l'atteint (défini comme la vulnérabilité au sens strict du terme)

Cette formulation signifie que pour être atteint par un phénomène, il faut effectivement être dans un lieu exposé, être présent et qu'il y ait un événement. Dans les faits, seul un lieu (ou une zone géographique) est exposé. La présence d'une personne ou un bien présent en ce lieu lui confère le caractère "exposé".

Les probabilités utilisées dans cette formulation, les fonctions f_{risque} et $f_{occurrence}$ sont conceptuelles et ne servent qu'à illustrer les dépendances du concept de risque avec l'occurrence, l'atteinte et la présence et d'autre part, le lien entre l'occurrence et des facteurs dits permanents et des facteurs aggravants ou déclenchants.

Sur le fond, la formulation n'écarter pas certaines ambiguïtés. Par exemple, la présence dans un enjeu exposé ne génère pas forcément un dommage : comment traiter le cas d'une personne située dans un niveau refuge d'une habitation exposée (touchée par une avalanche) ? est-ce que le même niveau refuge est exposé ou pas suivant que l'habitation est construite en bois ou en béton armé ? Le concept de vulnérabilité se limite ici à une vulnérabilité structurelle alors que différentes formes de vulnérabilité existent en fonction de la relation entre l'enjeu et l'aléa (directe, indirecte), du type de conséquences induit par le phénomène (physique, humaine, matérielle, économique, psychologique ...).

Nous proposons ici une variante plus détaillée exprimant le risque comme un croisement entre l'aléa, la conséquence (manifestation objective quantifiable) et la valeur accordée à ces dommages. L'aléa est décliné par type de phénomène et d'effets (FIG. 2.9). Pratiquement, cette approche est déclinée en autant de sous-composants correspondant aux effets possibles induits

par les phénomènes : une crue torrentielle peut provoquer des dommages liés à la submersion (noyade, pression sur les parois), à l'impact des blocs et/ou troncs charriés (blessure, endommagement), à la présence de matériaux solides (salissure, pression)³. Par rapport à chacun de ces effets physiques, la vulnérabilité des enjeux, considérée comme un potentiel de dommages, sera différente. Il n'y a donc pas une seule "équation" du risque mais une composition de plusieurs éléments ou critères. Cette équation "conceptuelle" est en fait difficile à évaluer en pratique : évaluer la vulnérabilité et les probabilités d'occurrence, d'atteinte constituent des verrous scientifiques importants (Fuchs, 2008; Brundl et al., 2008).

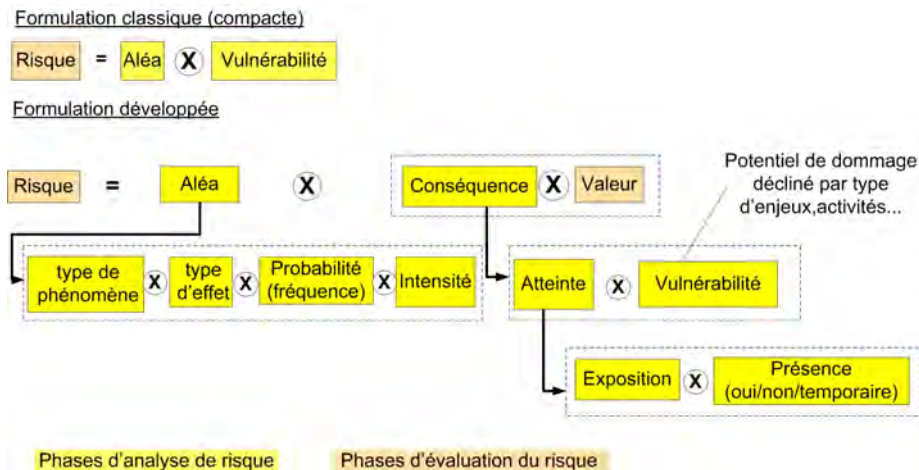


FIGURE 2.9 – Décomposition détaillée du concept de risque

En conclusion de cette analyse des modes d'estimation du risque, on retient finalement que la détermination du niveau de risque apparaît comme une combinaison de plusieurs critères. Le caractère formel de la présentation quantitative des risques s'accompagne en fait d'une part importante de subjectivité en terme de quantification des probabilités déterminant les niveaux de risque et d'équivalence entre les situations de risques.

2.2.2 Réduire le risque

Ce paragraphe décrit le contexte et la diversité des objectifs de gestion associés aux différentes phases de la gestion.

Cadre global et objectifs de gestion des risques

Les trois grandes classes d'action associées aux concepts de risque comprennent l'analyse de risque, l'évaluation du risque et la gestion du risque (Renn and Graham, 2006) qui peuvent-être décrites à la fois d'un point de vue spatial et temporel. En prenant comme référence l'occurrence de l'événement, considéré comme une réalisation d'un phénomène aléatoire, on peut distinguer les phases de prévention, de gestion de crise et de retour d'expérience ou de réparation. L'expertise peut être mobilisée au niveau de chacune de ces phases dont l'enchaînement peut être représenté sous la forme d'un cercle ou d'une boucle (Bourrelier et al., 2000)⁴(FIG. 2.10). L'expertise envisagée dans le cadre de ce travail concernera principalement les phases de prévention et de retours d'expériences ou d'analyses post-événement.

3. voir aussi FIG. B.3 et FIG. B.4 en annexe B.2, p. 333et p. 334

4. voir aussi www.planat.ch

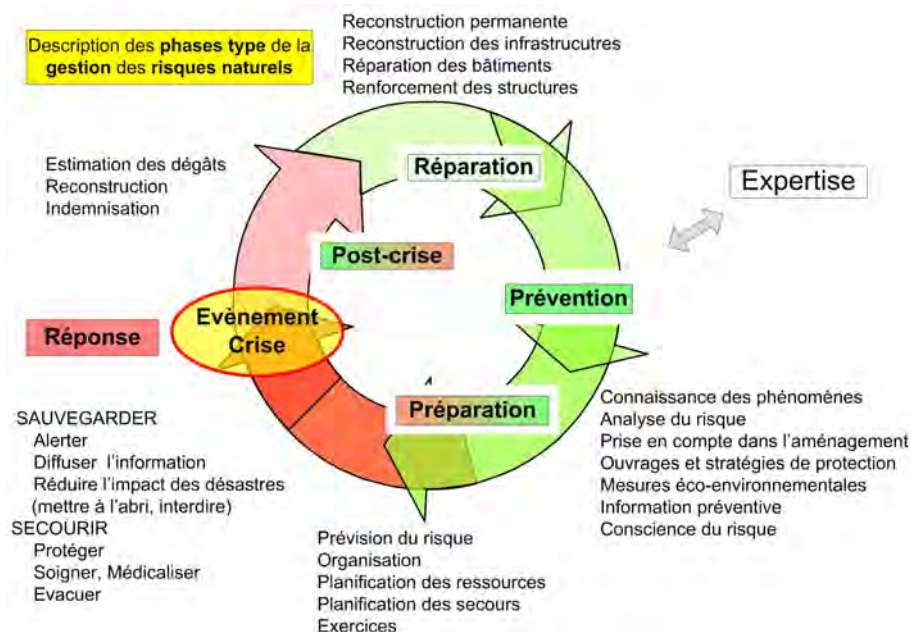


FIGURE 2.10 – Cercle de la gestion des risques

Dans le cadre d'une analyse physique, les phases habituellement considérées correspondent au déclenchement, à la propagation et à l'interaction avec les enjeux ou phase d'arrêt (en faisant l'hypothèse que les enjeux ne pas supposés être implantés dans des zones d'écoulement rapides) (Tacnet et Burnet, 2007). Sur ces bases, plusieurs modèles de risques sont proposés. Dans le domaine des inondations, le modèle "source - zone de propagation - récepteur" (FIG 2.11) est classique (FLOODSITE, 2005). Ce modèle s'apparente assez étroitement à la décomposition en vigueur dans le domaine des risques gravitaires rapides qui distingue les phases de déclenchement, propagation et d'arrêt.

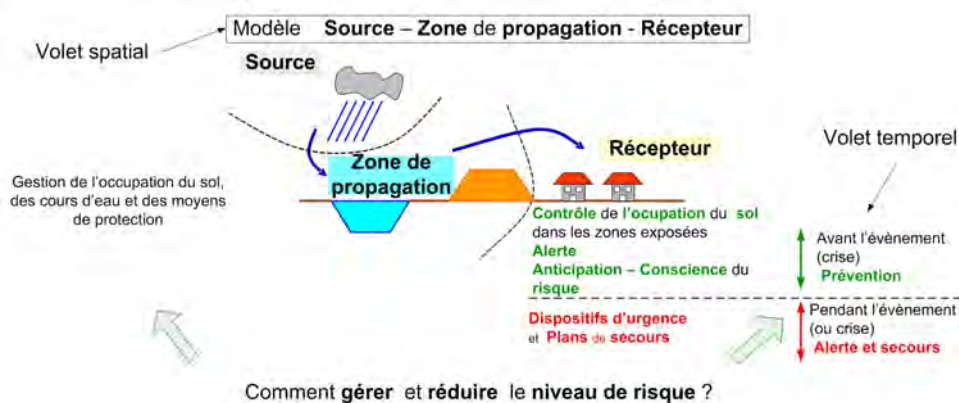


FIGURE 2.11 – Dimension spatiale et temporelle de la gestion du risque : exemple du modèle "source - zone de propagation - récepteur"

Mesures structurelles et non structurelles

Le risque peut être réduit en agissant sur chacune de ses principales composantes (FIG. 2.12). Les mesures structurelles correspondent à la mise en place d'ouvrages de protection. Ces ouvrages visent ainsi soit à limiter de manière active l'intensité du phénomène (aléa) en agissant sur les causes des phénomènes par le biais d'ouvrages de protection (par exemple, des barrages de

correction torrentielle) (Deymier et al., 1995), soit à limiter les conséquences ou effets sur les enjeux dans le cadre de stratégies passives (voir annexe B.3, p. 335).

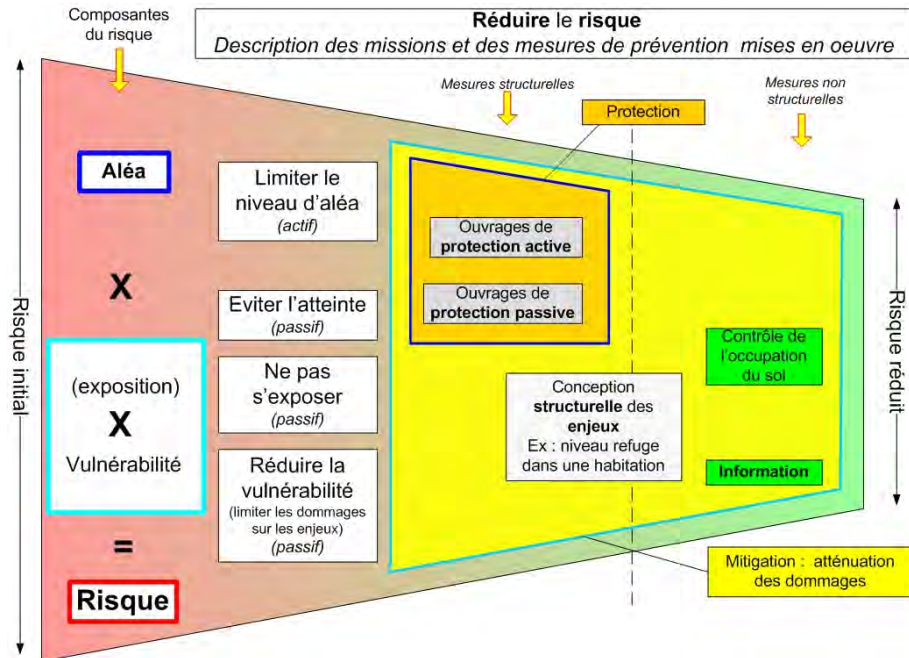


FIGURE 2.12 – Les moyens de réduction du risque

Les notions de protection et de prévention sont souvent confondues. Un classement des types de mesures de réduction du risque peut être proposé en considérant la prévention comme un concept de nature temporelle, la protection regroupant alors des mesures structurelles ou non-structurelles (Tacnet et Burnet, 2007) (FIG. 2.13).



FIGURE 2.13 – Les concepts de prévention, protection et mitigation

Ces mesures peuvent être spatialisées en rapport avec les différentes zones fonctionnelles associées aux phases temporelles (déclenchement, propagation, arrêt) des phénomènes gravitaires rapides (FIG. 2.14).

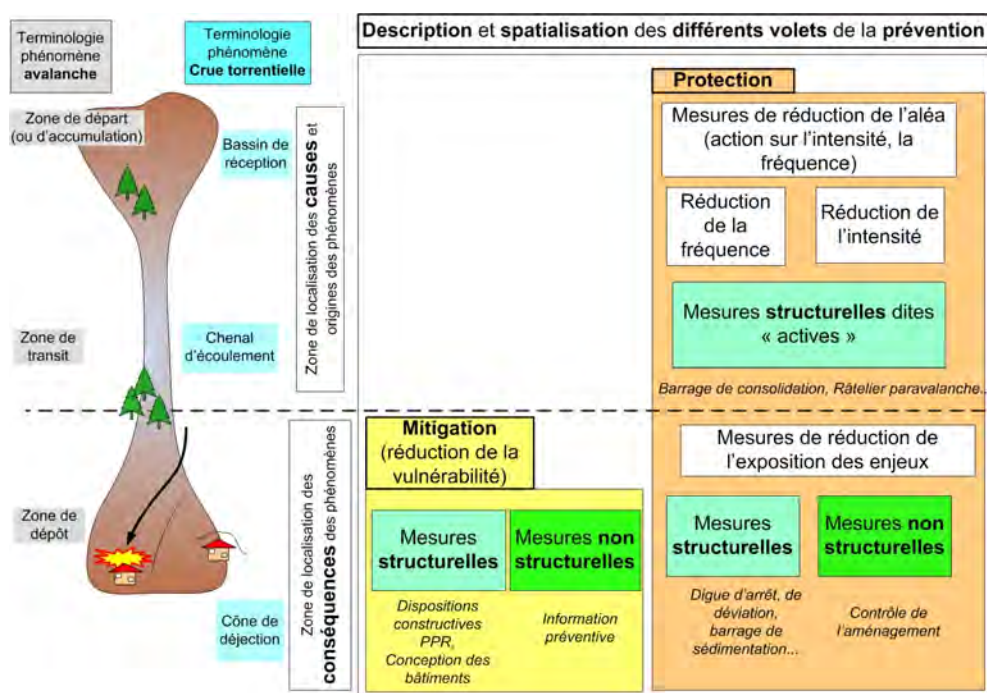


FIGURE 2.14 – Actions de prévention et de mitigation : l'exemple des risques de crues torrentielles et d'avalanches

Une analyse basée sur des critères multiples

Cette analyse constitue la base d'un processus de décision associé à l'expertise des risques naturels. Un sujet d'expertise primordial consiste par exemple à choisir entre des stratégies et moyens de prévention et d'analyser leur efficacité : comment et sur quels paramètres agit un dispositif de protection active ? passive ? sur quels facteurs peut-on agir ? quel ouvrage est essentiel ? En terme d'analyse des risques, les approches précédentes sont déclinées en autant de sous-composants correspondant aux effets possibles induits par les phénomènes. Par rapport à chacun des effets physiques, la vulnérabilité des enjeux, considérée comme un potentiel de dommages, sera différente. La formulation intégratrice du niveau de risque synthétise donc la complexité et la diversité des composantes du risque (voir annexe B.2, p. 333) que cherche à évaluer l'expertise. Ces composants constituent autant de critères à prendre en compte pour produire une décision dans le cadre d'une expertise technique ou de la gestion globale des risques.

2.3 Formes et modalités d'expertise

2.3.1 Contexte et méthodes de l'expertise

Les experts, des acteurs de la gestion soumis à ... l'incertitude

Définition de l'expert. Au sens commun (Dictionnaire Le Robert, 1993), le terme d'expert désigne à la fois une personne qui est, soit dotée d'une habileté pratique acquise par l'expérience, soit une personne compétente et savante, soit un spécialiste chargé de faire des constats et des évaluations, soit enfin, un spécialiste chargé de résoudre le problème auquel est confronté son commanditaire. Cette diversité se retrouve bien dans le domaine de la gestion des risques naturels et justifie, sauf exception, le recours à des équipes d'experts issus de disciplines, de cultures et d'expériences différentes, et mobilisant des méthodes variées notamment dans les cas complexes : un chercheur en mécanique des fluides n'apportera pas les mêmes compétences

qu'un ingénieur en génie civil expérimenté dans l'analyse et la conception d'un dispositif de protection efficace ou qu'un expert "naturaliste", capable d'analyser finement les phénomènes à partir d'une "lecture" du terrain. La nécessité d'une telle complémentarité entre des approches de modélisation et "naturaliste" a ainsi été présentée par Lacroix (2006) comme essentielle en faisant un parallèle avec la fable de l'aveugle et du paralytique (de Florian, 1792).

La reconnaissance de l'expertise est variable. Les acteurs de la gestion des risques prennent des décisions en exploitant les résultats et/ou les avis exprimés ou collectés par d'autres acteurs. En France, le risque concerne l'Etat, ses administrations mais aussi les collectivités locales, les acteurs politiques et le citoyen. Les politiques élaborent les réglementations en matière de risque. Veyret (2004) analyse le positionnement relatif des scientifiques, des experts et des ingénieurs. Les scientifiques et les techniciens analysent l'aléa et les modalités de l'endommagement. Le rôle de l'expert a évolué. Une culture d'ingénieurs a longtemps placé au premier plan les réponses techniques aux dangers. A l'heure actuelle, il n'est pas le mieux armé pour définir le risque acceptable avec des critères psychologiques, sociologiques, scientifiques, économiques, statistiques. La place des experts est donc jugée délicate : l'absence fréquente de connaissances suffisantes pour produire des diagnostics définitifs et les divergences d'avis entre experts caractérisent leur action. L'incertitude dans les conclusions des experts peut donc être acceptée comme normale (Veyret, 2004).

Ces incertitudes, souvent non explicitées, conditionnent le comportement et les conclusions des experts. L'expert n'applique pas des règles préétablies mais doit synthétiser et apprécier les observations et données dont il dispose pour produire son analyse. La rationalité apparente de son raisonnement est remise en cause à plusieurs niveaux :

- les données dont il dispose sont souvent partielles et leur validité peut parfois être douteuse ;
- en tant qu'humain, il n'échappe pas aux biais cognitifs connus et décrits dans le domaine de la psychologie comportementale ;
- la connaissance des phénomènes physiques reste incomplète ;
- la pression sociale et son statut de "sachant" rendent difficile l'explicitation et l'affichage d'une incertitude. L'expert est payé ou au minimum sollicité pour fournir des solutions plutôt que faire état de ses doutes ;
- la prise en compte des incertitudes multiplie les scénarios. En ce sens, elle peut éclairer le décideur mais complique aussi sa décision et augmente la pression qui s'exerce sur lui.

Peu de méthodologies existent

L'expertise des phénomènes naturels nécessite d'associer des approches quantitatives et "naturalistes" plus globales et descriptives mais tout aussi importantes (Lacroix, 2006). Ces dernières sont peu étudiées dans le domaine des risques torrentiels même si des travaux visant à identifier et décrire les phénomènes comportent des parties méthodologiques relatives à ces approches expertes (Bardou, 2002). Dans le domaine des avalanches, l'approche "naturaliste" également qualifiée d'*experte*, représente un ensemble de procédures qui permettent d'appréhender le fonctionnement d'un site avalancheux. Cette approche se veut pluridisciplinaire, rationnelle (en expliquant le raisonnement), qualitative (en donnant des ordres de grandeur, des fourchettes), fondée sur l'expérience, analytique (sur la base de faits analysés) et critique (par rapport à la qualité de l'information) (Ancéy, 2006). Cette définition, donnée dans le contexte des avalanches, est générique et peut s'appliquer à d'autres risques naturels.

Les méthodologies ne sont généralement pas orientées vers l'aide à la décision pour choisir, classer, ranger explicitement des solutions ou des sites exposés. La littérature concerne principalement des analyses qualitatives et quantitatives des phénomènes, considérées comme des éléments d'*aide à la décision*. Il existe cependant dans le domaine des crues torrentielles, quelques

approches assez anciennes. Mura (1985) a proposé une méthodologie pratique relative au choix de priorités d'intervention entre des séries domaniales⁵ de restauration des terrains en montagne (*RTM*). La méthodologie d'étude de bassin versant, formalisée par Meunier (1987), définit trois phases relatives à l'analyse des processus érosifs, leur quantification puis la conception et le dimensionnement des protections. Il n'existe pas non plus de typologie d'expertise en relation avec les types de décision prises même si les acteurs concernés, l'objet de l'expertise (évaluation, choix de stratégie de gestion), l'étendue spatiale ... peuvent permettre de les distinguer en première approche. Les décisions ont en effet soit une portée locale (site torrentiel, site avalancheux) ou plus globale (territoire régional, national, bassin versant ...). Les décisions peuvent concerner des phases d'expertise technique (caractérisation des phénomènes dans un bassin versant torrentiel) ou des niveaux stratégiques à une échelle nationale (définition d'une politique et/ou de priorités d'action).

2.3.2 Le dilemme de l'expertise : analyser et agir sans pouvoir tout connaître

Malgré l'ensemble des connaissances disponibles, l'analyse des risques comporte toujours une part d'incertitude dite irréductible associée au caractère aléatoire des phénomènes et aussi au défaut de connaissances. Quelques situations en illustrent les difficultés pratiques et concrètes.

L'explication est toujours plus facile que la prédétermination ...

En 2005, le torrent d'Armançette (Contamines-Montjoie, Haute-Savoie, France), génère une lave torrentielle de l'ordre de 200000 m³ qui déborde en rive droite, touche quelques maisons et s'arrête dans la cour de la halte-garderie. Une visite post-événement permet de proposer une première analyse (Chambon et al., 2005). L'incision généralisée du lit dans la partie supérieure du chenal, sur une largeur de plus de 10 m et une profondeur de l'ordre de 8 m, est tout à fait surprenante et n'aurait probablement même pas été envisagée dans le cadre d'une prédétermination avant l'évènement. L'analyse post-événement a, quant à elle, expliqué et analysé le phénomène observé : expliquer est en effet toujours plus facile que prédéterminer. En partie médiane du chenal, des barrages de correction torrentielle ont été affouillés de plusieurs mètres en quelques jours : un horizon gypseux non identifié à la construction constituait en fait la partie inférieure du lit (FIG. 2.15).

5. forêts, zones acquises par l'Etat

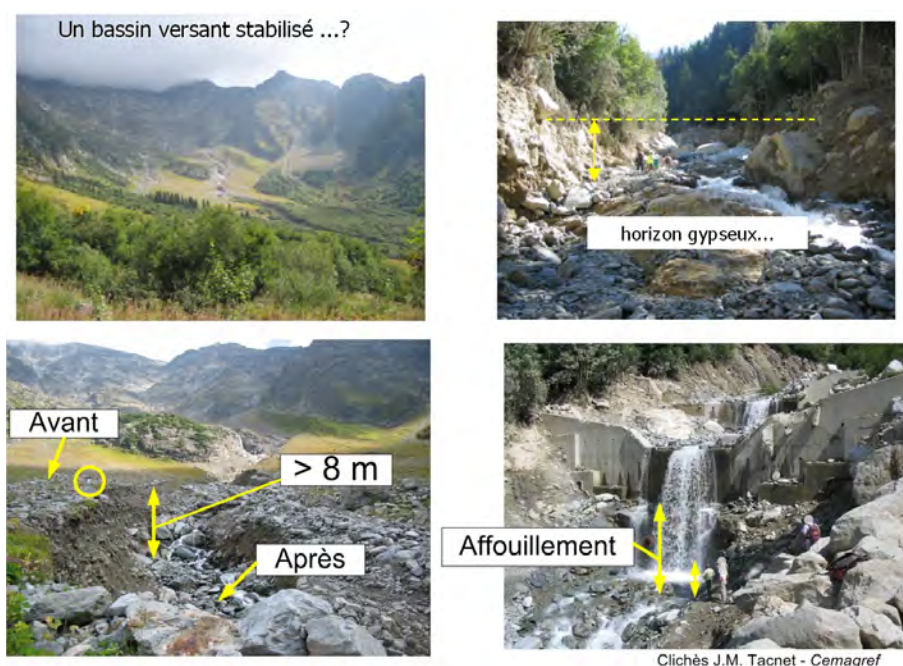


FIGURE 2.15 – Les niveaux d'incision du chenal d'écoulement en partie haute et médiane du chenal d'écoulement n'étaient pas prévus

L'étude historique des sites, jamais très facile à organiser, apporte la plupart du temps suffisamment d'information sur les phénomènes potentiels. Les scénarios alternatifs ne correspondent cependant pas toujours à des références historiques et à des situations ayant déjà été observées. Imaginer des scénarios de phénomène alors que rien ne s'est encore produit fait alors partie de situations d'expertise particulières difficilement probabilisables.

De la difficulté de la description d'un phénomène : les bases fragiles du raisonnement

L'analyse post-événement d'une avalanche est essentielle pour déterminer le scénario et les caractéristiques de l'avalanche puis en assurer la transcription dans les bases de données événementielles (*EPA*⁶) et cartographiques (*CLPA*⁷) qui fourniront des données servant à alimenter des simulations numériques. Dans ce cadre, l'observateur doit essayer de déterminer le volume de neige au départ puis le confronter à une estimation du dépôt observé dans la zone d'arrêt. Il fait pour cela une ou plusieurs hypothèses relatives à la densité de la neige dans la zone de déclenchement et de propagation en observant les traces laissées par l'écoulement pour déterminer s'il s'agit d'une avalanche coulante, aérosol ou mixte aux différents points de passage. La détermination de la longueur de cassure se fait généralement à distance, sauf dans les rares cas où le risque de déclenchement résiduel d'avalanche est nul et l'accès est possible. Outre les conditions météorologiques, la position du point d'observation conditionne à lui seul la précision de l'estimation effectuée par l'observateur (FIG. 2.16).

6. Enquête permanente sur les avalanches

7. Carte de localisation des phénomènes d'avalanches

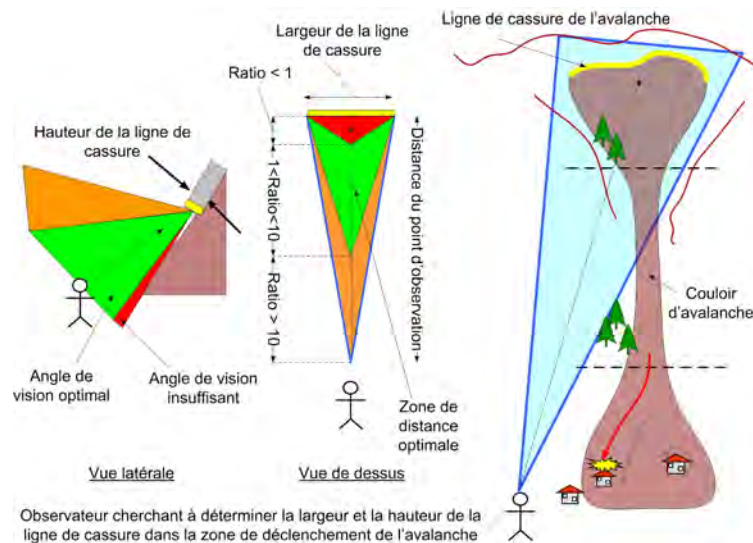


FIGURE 2.16 – De mauvaises conditions d’observation compromettent l’estimation du volume de neige au départ de l’avalanche

La qualité des données disponibles lors des relevés post-événements impacte directement la pertinence des scénarios de description des phénomènes. Des indicateurs qualitatifs ont été proposés pour qualifier des phénomènes observés (information bonne, moyenne, mauvaise) sans explicitation de l’échelle servant à l’évaluation de la qualité des données stockées dans les bases de données événementielles (Hübl et al., 2002). L’enjeu est ici de proposer une méthode pour justifier la confiance que l’on a dans l’information recueillie. Pour contribuer à cet objectif, le principe d’un couplage entre l’expertise et la qualité des données a été imaginé (Tacnet et al., 2006). Un niveau de qualité globale est affecté à chacune des analyses effectuées dans le cadre de l’expertise post-événement. La nature des informations disponibles est déjà un critère permettant de déterminer des niveaux croissants de confiance dans l’estimation : la confiance dans l’analyse du scénario de déclenchement sera meilleure si l’information utilisée comporte par exemple des relevés météorologiques locaux par rapport à une situation d’absence totale de données sur ce volet (FIG. 2.17). Le scénario du phénomène d’avalanches correspond à la description des phases de déclenchement, de propagation et d’arrêt. À chaque étape, le principe consiste donc à évaluer les critères de l’avalanche (longueur de la cassure, volume de neige au départ ...) mais aussi de déterminer la confiance dans la mesure ou l’évaluation du critère en fonction des conditions d’observation et des informations disponibles. Une première approche propose donc de représenter l’expertise post-événement comme l’association d’une couche d’évaluation du critère et d’une couche liée à la fiabilité de l’information. Sur la couche d’"expertise", un modèle de décision hiérarchique décrit la décision d’expertise et sur la couche "qualité des données", un autre modèle définit la confiance en chacune des informations utilisées.

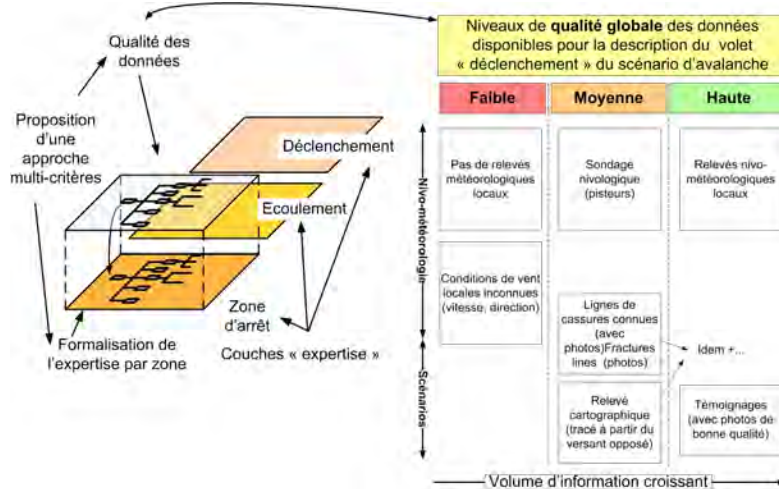


FIGURE 2.17 – Un premier principe de prise en compte de la qualité de l'information dans l'expertise

Un exemple d'expertise révélateur des incertitudes et des contradictions

Des enjeux et décisions capitales. Le cas de la commune de Mont-Dore (Puy-de-Dôme, France) est un exemple frappant du contexte d'expertise. En janvier 2004, en pleine nuit, une coulée de boue (lave torrentielle) d'un volume estimé à 5000 m³ traverse le lotissement des "Egravats" et dépose des blocs métriques sur la route d'accès à la station de ski du Mont-Dore. La coulée a débordé d'un modeste chenal de quelques m² de section construit quelques années en arrière à la suite d'une première expertise. Les chalets en amont du cône de déjection sont touchés. Par chance, et en raison de l'heure tardive, la coulée ne fait aucune victime dans le lotissement et sur la route d'accès à la station, régulièrement empruntée par des véhicules de tourisme et de transport en commun. Ne connaissant pas l'état de la menace résiduelle, le préfet, conseillé par un groupe d'experts, ordonne l'évacuation de 49 chalets et conditionne le retour des habitants à la production d'une expertise favorable en ce sens. Un groupe d'experts⁸ va être mandaté pour infirmer ou confirmer la mesure d'évacuation. L'enjeu de l'expertise est considérable : un des scénarios évoqués correspond en effet à l'expropriation et à la destruction totale des chalets. Une première étude des données bibliographiques disponibles cherche à identifier les phénomènes connus et analyse les conclusions des nombreuses études préexistantes. Le constat est troublant : les volumes attendus, évoqués dans les diverses études, s'étalent de quelques centaines à plusieurs dizaines de milliers de m³ (FIG. 2.18). Parmi les experts ayant exprimé les plus faibles valeurs, se retrouve une personne reconnue internationalement pour ses compétences en mécanique des sols mais qui s'avérera finalement n'avoir fait qu'une visite éclair sur le site. L'analyse permet également de découvrir que les expertises ne sont étayées par aucune mesure de terrain. La question reste donc posée tant sur le risque de coulée de boue que sur celui de chute de blocs : quels sont les volumes de coulées et de chute de blocs possibles ? peut-on protéger le site et autoriser le retour des habitants. Une étude de plusieurs mois, étayée par de nombreux essais géotechniques in situ, conclut finalement à la possibilité de protection du site (Berger et al., 2004).

8. BRGM, Cete/LRPC, Cemagref

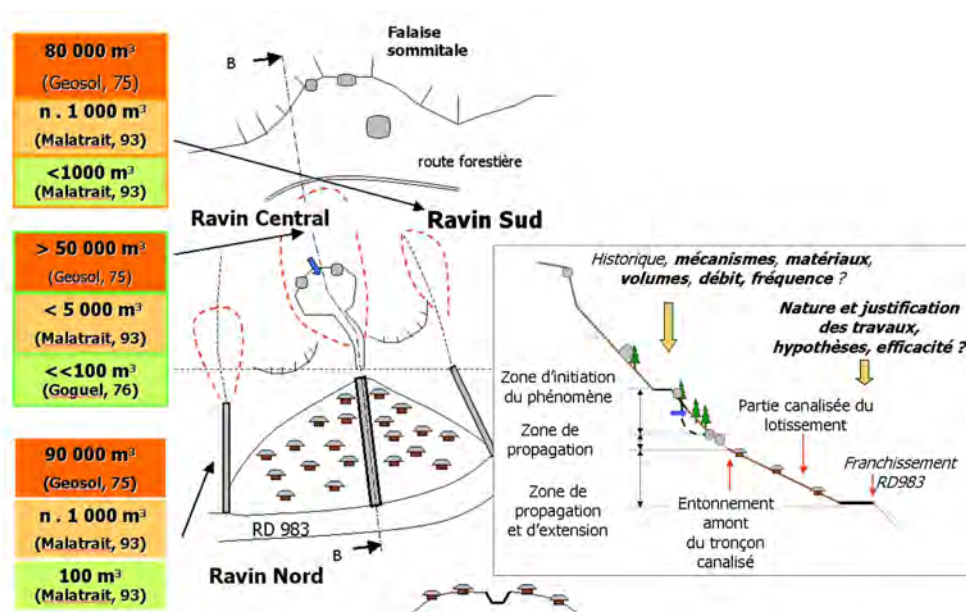


FIGURE 2.18 – Comment considérer des expertises contradictoires ?

Les approches quantitatives et les modèles sont toujours interprétés Pour analyser les scénarios d'écoulement et de débordement de lave torrentielle, toujours dans le cadre de cette expertise, une modélisation numérique d'étalement est réalisée sur la base de volumes d'entrée fournis par une autre équipe d'experts chargés de déterminer les volumes de départ provenant d'un glissement. En l'absence de mesures réalisées sur le matériau réel, les paramètres rhéologiques du fluide sont approchés dans le cadre de scénarios d'événements choisis par l'expert en prenant en compte les situations les plus défavorables en terme de hauteur ou distances atteintes. Les simulations permettent ici de définir des enveloppes indicatives : les résultats de modélisation numérique ne sont en effet pas utilisés de manière brute pour produire des cartes d'aléas (FIG. 2.19) mais font l'objet d'une interprétation (Tacnet et al., 2005b). Le résultat du zonage est donc finalement une adaptation proposée sur la base de la simulation mais aussi d'une appréciation de facteurs d'aggravation tels que des embâcles ou des blocages de l'écoulement en raison de la présence de blocs.

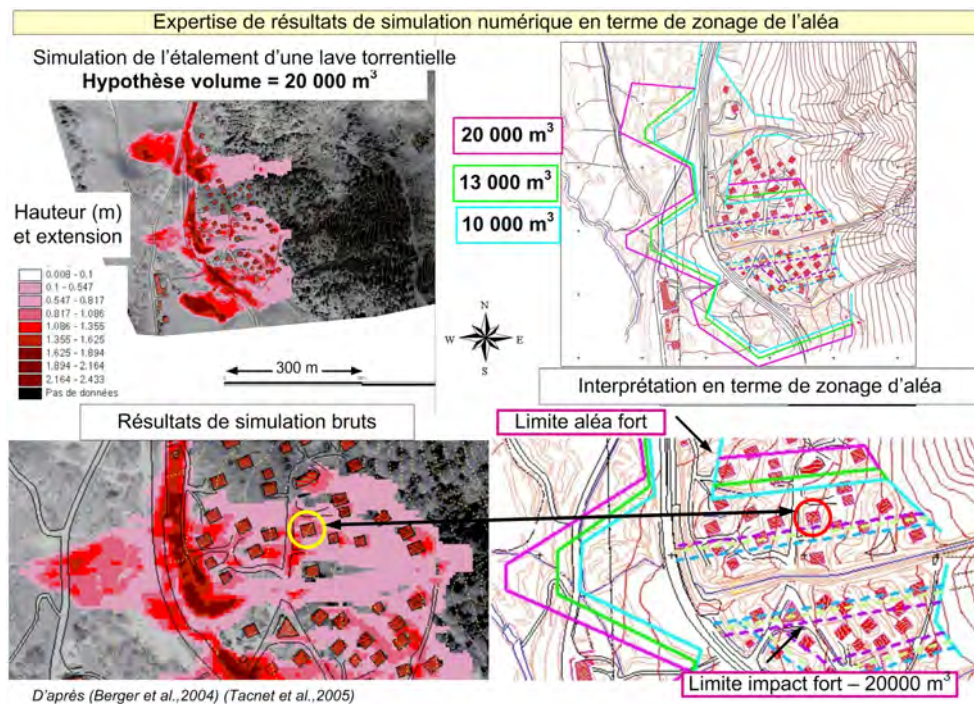


FIGURE 2.19 – L'expertise est nécessaire pour interpréter les simulations et proposer une solution opérationnelle. Le cercle est un simple point de repère)

De manière générale, même si l'utilisation de méthodes quantitatives est toujours recherchée, le raisonnement humain reste, avec la subjectivité qu'il comporte, primordial dans le résultat final de zonage des aléas. Dans le même temps, il est également reconnu que les approches quantitatives, notamment les simulations numériques, restent largement basées sur l'expérience de l'expert (conditions initiales, paramètres des modèles ...) et demeurent du même coup subjectives et incertaines (Brundl et al., 2008). Le jugement d'expert, reconnu comme indispensable, doit s'accompagner d'une description des hypothèses, des arguments et faire l'objet d'une description détaillée (Barbolini, 2008).

Les circuits d'information et leur caractère imparfait

Le processus global d'expertise est considéré comme un enchaînement complexe de traitements utilisant une information imparfaite par nature. L'information constitue le fondement des raisonnements, avis, et décisions exprimées dans le cadre de l'expertise des risques naturels. Elle provient de nombreuses sources au cours du processus d'expertise : mesures, capteurs, chroniques historiques, observations, avis d'expert. L'incertitude et l'imperfection associées à l'information se propagent dans le processus d'expertise (FIG. 2.20). Des données brutes de qualité médiocre, fortement subjectives peuvent être utilisées comme des données de modèles de simulation et tout autre raisonnement ou analyse déterministe. L'imperfection de l'information peut également n'être que contextuelle en raison par exemple d'une collecte de données insuffisante par manque de temps ou de moyens (on peut distinguer les informations disponibles mais non utilisées et les informations inexistantes).

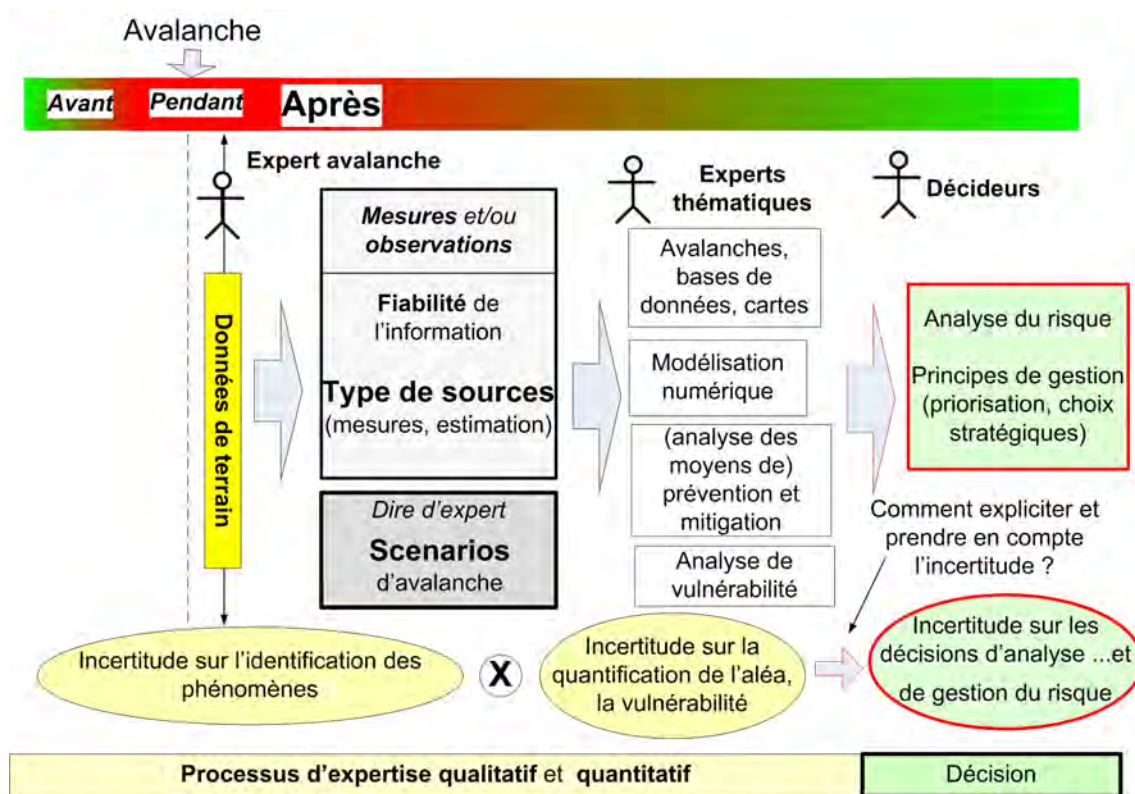


FIGURE 2.20 – L'incertitude provient des différentes phases de l'expertise

Le cas des plans de prévention des risques⁹ illustre cette problématique. Le contrôle de l'occupation du sol constitue en France une des principales mesures de prévention de type non-structurelle contre les risques naturels (Bourrelier et al., 1997). Le zonage préventif définit des zones où les constructions sont soit interdites, soit autorisées avec ou sans restrictions (FIG. 2.21). Les zones sont déterminées par croisement de l'aléa (le phénomène caractérisé en intensité et fréquence) et de la vulnérabilité associée aux enjeux. Ces plans sont mis en œuvre sur la base des connaissances disponibles. Des approches quantitatives sont conseillées mais il est aussi reconnu que les jugements d'expert sont indispensables pour pallier l'incertitude dans la connaissance des phénomènes et formuler les scénarios de référence sur la base de l'information disponible (Barbolini, 2008; Brundl et al., 2008; Tacnet et al., 2005a).

9. (prévisibles)

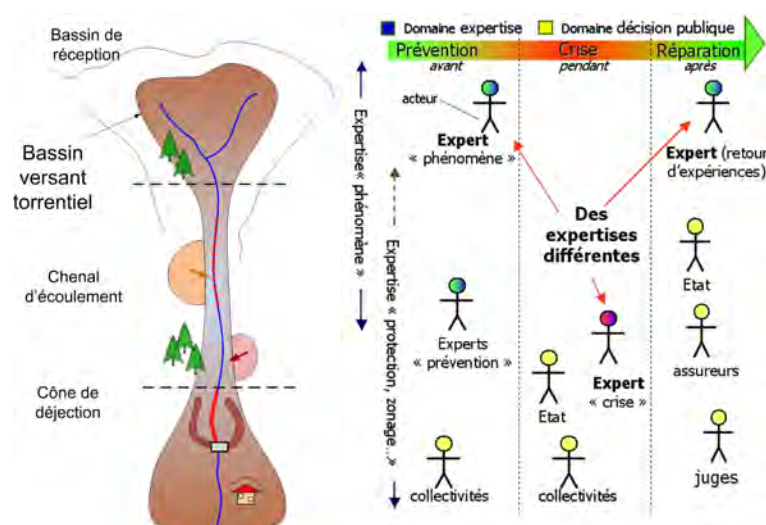


FIGURE 2.22 – Les différents types d'expertise

Décisions internes au processus d'expertise Dans le cadre de l'expertise d'un risque torrentiel, les décisions internes vont, par exemple, concerner l'identification du phénomène de référence (lave torrentielle, charriage), sa quantification (volume, zone d'apports), sa propagation (tracé, zone d'arrêt) et plus généralement le zonage de l'aléa... Un autre exemple de problématique courante et de plus en plus fréquente, suite au vieillissement des ouvrages, consiste à devoir évaluer l'état d'un dispositif de protection ancien et analyser son efficacité : doit-on, peut-on laisser se dégrader des ouvrages de protection ? où faut-il intervenir en priorité ? Cette analyse dépend de facteurs tels que le type d'ouvrages de protection, leur position dans le dispositif, leur matériau de construction, leur état, leur efficacité structurelle mais aussi fonctionnelle (Tacnet et Richard, 2009) (voir annexe B.3, p. 335).

De manière classique, l'expertise utilise autant que possible des méthodes quantitatives de modélisation associant des approches statistiques, des simulations numériques (Barbolini, 2008). Les experts utilisent aussi des outils basés sur la confrontation et l'analyse de critères multiples pour identifier les composantes du risque correspondant au phénomène et aux enjeux exposés. Ils prennent par exemple la forme d'échelles d'intensité, de typologies développées pour comparer les sites selon leurs caractéristiques morphologiques (Staub, 1999, 2001), hydrométéorologiques, analyser les risques de déclenchement et déterminer le potentiel physique d'aggravation par rapport à des phénomènes connus (Richard, 1995).

Pour qualifier des niveaux de risques, les praticiens utilisent également des méthodologies issues d'approches économiques telles que les approches coûts-bénéfices (Brundl et al., 2008). Dans le domaine des crues torrentielles, ces approches montrent cependant leurs limites notamment en raison de la difficulté d'évaluation de la vulnérabilité (Brochot et al., 2003; Fuchs and al., 2007).

Les décisions de gestion externes L'aide à la décision se situe donc souvent à un autre niveau que la stricte vision technique proposée par une expertise.

L'expertise technique ne produit pas directement de décisions de gestion qui mobilisent d'autres acteurs et intègrent des facteurs liés à l'impact social, économique, financier, environnemental des mesures. Ces décisions qualifiées d'"externes" sont évidemment les plus complexes. L'expertise technique ne fait ici que participer à l'élaboration de décisions de gestion. Il peut s'agir par exemple de choisir des priorités de protection en considérant des contraintes techniques, économiques, politiques. *Le risque zéro n'existe pas* (Guilhou et Lagadec, 2002) et pour

des raisons financières, la protection ne pourra toujours être que partielle : dans ces conditions, comment choisir les enjeux à protéger en priorité ? comment choisir des parcours et stratégies à dommage minimal, acceptant des dégâts localement pour mieux protéger ailleurs ?

En situation d'urgence, un élu va être confronté à d'autres choix délicats. A quel moment faut-il évacuer temporairement une zone même si celle-ci est protégée par un ouvrage imposant ? Comment va-t'il décider et sur quels critères ? A ce moment, ces choix sont souvent faits par des non-spécialistes (responsables des collectivités locales, de l'Etat...) et la confiance dans l'information dont ils disposent va alors jouer un rôle essentiel dans la décision :

- Est-ce qu'on est certain de l'état du dispositif de protection ?
- Est-ce que tous les éléments techniques sont parfaitement connus en temps réel pour permettre la décision (hauteur de neige, stabilité des sols, circulations d'eau dans le sol ...) ?
- Est-ce que la chaîne opérationnelle est sans faille : accès, télécommunications ... ?

Conclusion sur les domaines de décision Dans le domaine des risques naturels, la prise de décision "interne" fait partie inhérente du processus d'expertise technique. Ces expertises contribuent aux décisions "externes" qui s'opèrent à des échelles allant de celle du bassin de risque (bassin versant torrentiel, site d'avalanche ...) à des échelles départementales, régionales voire nationales dans le cadre d'approches visant à identifier par exemple les sites prioritaires d'intervention, planifier des politiques publiques, gérer des infrastructures de communication Des modèles d'aide à la décision pour les risques naturels servent par exemple à déterminer les sites à risques sur des secteurs géographiques étendus dans le domaine par exemple du risque minier (Merad et al., 2004), du risque d'avalanches (Rapin et al., 2004) ou du risque routier. Les solutions (ou alternatives) correspondent alors aux sites devant être évalués par des opérateurs différents.

Des méthodes d'aide à la décision sont donc requises dans le cadre des décisions internes au processus d'expertise et externes dans le cadre de décision de gestion. Fournir des éléments et un cadre méthodologique pour améliorer et aider les processus de décision liés à l'expertise est donc un véritable enjeu. Dans la pratique, pour répondre aux besoins, des outils sont développés parfois très empiriquement, sans références explicites avec des cadres méthodologiques d'aide à la décision reconnus.

Les méthodes d'aide à la décision pour les risques : un existant "non conventionnel" et un besoin de polyvalence

Les modèles de décision simplifiés et empiriques Pour répondre aux besoins, des modèles d'aide à la décision simplifiés sont conçus par les praticiens en combinant les critères par le biais de sommes pondérées par exemple pour l'évaluation de la vulnérabilité (Chauviteau et Vinet, 2006), de la sensibilité des sites au risque d'avalanche (Rapin et al., 2004), de l'exposition des routes aux chutes de blocs (Gaussin, 2009)... Si chaque modèle est pensé pour un objectif déterminé, les données qu'il exploite peuvent par contre servir dans de nombreuses problématiques : les critères descriptifs, morphologiques d'un site d'avalanche ou d'un bassin versant torrentiel sont en effet indépendants du contexte décisionnel dans lequel ils sont utilisés. Ils auront par contre des importances variables selon les cadres de décision. Les regroupements effectués entre ces critères et l'importance qui leur sera accordée dépendront par contre de la décision à prendre. On peut faire ici une analogie avec la réorganisation d'un plan d'un document (la décision) dont on conserverait le même contenu mais en classant les paragraphes (les critères) autrement pour changer le message d'un texte. Il y a donc plusieurs objectifs pour assurer la plus grande polyvalence aux données disponibles. Considérant qu'il existe autant de modèles que de problèmes de décision et d'analystes (Roy, 1985), le principe est de dissocier l'évaluation des données et l'analyse en vue d'une décision pour permettre d'exploiter la connaissance métier

dans ces différents contextes. En complément, un modèle doit pouvoir être transformé en un autre modèle. La transformation ou reconfiguration de modèles de décision existants permet de se conformer à des méthodologies éprouvées et garantit une "interopérabilité" des cadres de décision.

Capitaliser la connaissance experte constitue un autre enjeu associé à l'analyse de ces outils d'aide à la décision empiriques. Ils se basent en effet sur un savoir-faire et une connaissance essentielle des volets "métier" associés aux problématiques de décision pour les risques naturels. Au-delà des méthodes d'aide à la décision, l'identification de l'information disponible et utile, la hiérarchisation des critères descriptifs, la définition des classes d'évaluation sont en effet autant d'éléments indispensables à l'élaboration de tout système d'aide à la décision. Reconnaître et capitaliser cette connaissance experte est essentiel. Au delà de l'intérêt méthodologique et scientifique, cette démarche correspond également à une logique et une rationalité économique pour les pouvoirs publics. Dans le cadre de dispositifs d'aide à la décision et de systèmes d'information, l'essentiel du coût se situe en effet au niveau de la collecte des informations. La valorisation des données indépendamment des traitements et méthodes est donc d'un intérêt majeur pour valoriser l'investissement et les résultats.

L'exemple du dispositif "Sites Sensibles Avalanches" (SSA)

Le 9 février 1999, une avalanche de neige meurtrière a détruit partiellement ou totalement 20 chalets et causé la mort de 12 personnes dans le hameau de MontRoc (Commune de Chamonix). La configuration particulière du site, marquée par la présence d'un ressaut dans le profil en long, a mis en évidence a posteriori la forte dangerosité de ce type de topographie en cas d'avalanches. En effet, une zone de ressaut constitue une zone d'arrêt en altitude. Si elle est dépassée, il se produit à nouveau une vive accélération de l'avalanche avec un risque d'atteinte accru d'habitations situées jusque sur le versant opposé. Il s'agit donc de vérifier les niveaux de risque pour l'ensemble des sites d'avalanches. Une méthode est créée pour classer les sites et aussi définir des priorités d'intervention en matière de politique de prévention (Rapin et al., 2004, 2006). L'objectif fixé est *"d'établir une méthode permettant d'identifier les couloirs et de les hiérarchiser en fonction du risque qu'ils génèrent, afin de répartir ultérieurement au mieux les efforts de prévention"* (Rapin, 2007). Le dispositif de collecte de données concerne aujourd'hui plus de 4000 sites mobilisant annuellement des moyens humains et financiers considérables. Il est commandité par le Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement Durable et de la Mer (MEEDDM)¹⁰ en collaboration avec le Cemagref¹¹ pour la partie méthodologique, formation, gestion des bases de données, bilan de classement et l'ONF/RTM¹² pour la partie collecte d'information sur le terrain¹³. Les cotations obtenues déclenchent des procédures d'information conduites par les préfetures à destination des collectivités locales concernées.

La sensibilité d'un site d'avalanche est définie sur la base de critères descriptifs relatifs à la vulnérabilité, la morphologie, les conditions nivo-climatologiques et l'histoire (FIG. 2.23).

10. Direction Générale de la Prévention des Risques, DGPR

11. Institut de Recherche pour l'Ingénierie de l'Agriculture et de l'Environnement

12. Office National des Forêts/Service de Restauration des Terrains en Montagne

13. Les résultats et la méthodologie sont disponibles sur le site www.avalanches.fr choix sites sensibles

2.3. FORMES ET MODALITÉS D'EXPERTISE

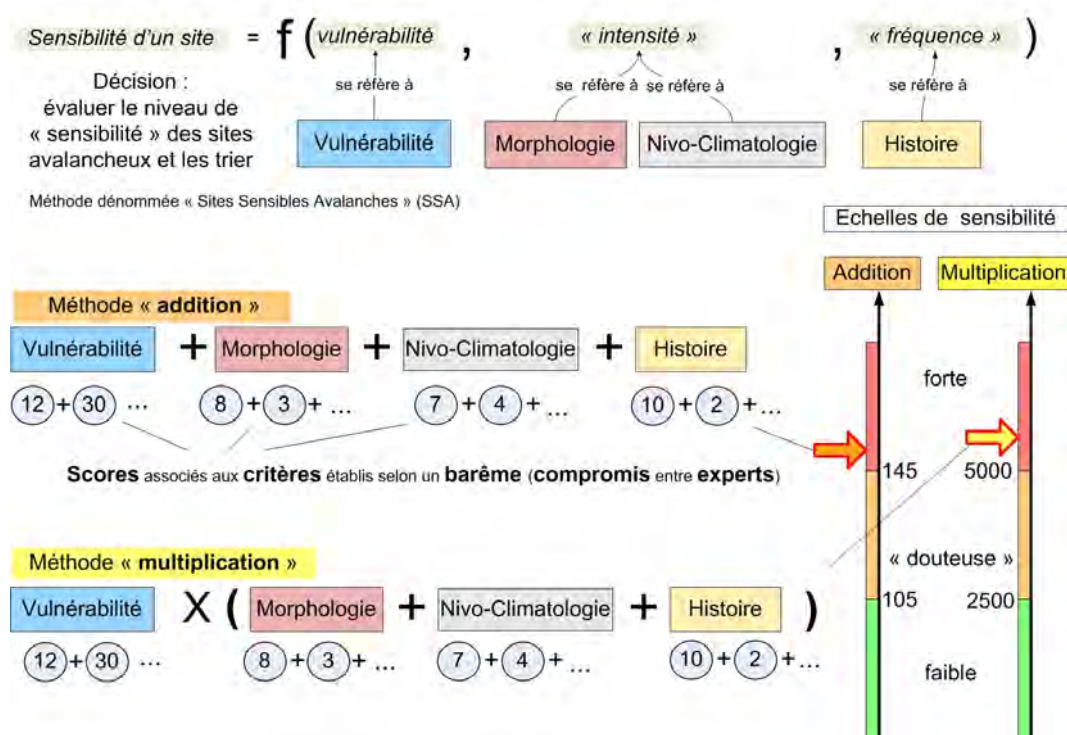


FIGURE 2.23 – Principe de la méthode de classification des Sites Sensibles Avalanches (SSA)

Chaque critère est décomposé en classes d'évaluation que l'observateur choisit de retenir de manière exclusive en fonction des caractéristiques du site. Chaque choix est affecté d'un score résultant d'un barème de cotation (FIG. 2.24) proposé par un groupe de 7 experts ayant créé la méthode et qui ont souhaité répartir les poids selon le principe suivant : Vulnérabilité (50%), Morphologie (25%), Nivo-Climatologie (15%) et Histoire (10%). L'affectation est reconnue comme pouvant faire l'objet d'une certaine imprécision : "c'est l'ordre de grandeur qui prime sur la valeur exacte" (Rapin, 2007).

Fiche d'utilisation Morphologie

Tableau 5 : Définition des différents critères et des scores du groupe « Morphologie »

Critère Morphologie	Élément	Classe	"Score"	
			possible	retenu (0 par défaut)
2.1 Emprise du passé : Surfaces (en projection, en ha)	2.1.1 Zone de départ avec accumulation (pente >53%=28° et <120%=50°)	>= 10	10	
		5 =< < 10	6	
		2 =< < 5	2	
	2.1.2 Rapport Zone de départ / Zone d'arrivée (pente < 27%= 15°)	>= 3	7	
		1,5 =< < 3	4	

FIGURE 2.24 – Exemple de classes d'évaluation de critères morphologiques - extrait partiel

Les scores obtenus sont ensuite agrégés selon deux méthodes correspondant respectivement à une simple somme et à une multiplication de deux groupes de critères associés à la vulnérabilité

et à l'aléa (FIG. 2.23). Les résultats permettent de placer le site considéré dans l'une des trois catégories correspondant à un niveau de sensibilité fort, douteux ou faible. Les résultats des méthodes sont étalonnés par rapport à une série de sites non spécifiés explicitement.

Une première analyse du dispositif permet de mettre en évidence des questionnements relatifs à la méthodologie employée :

- le caractère opérationnel de la méthode dépend de seuils déterminant les limites entre les résultats des évaluations : comment les seuils sont-ils choisis ? peut-il y avoir des égalités d'évaluation ? Les sites ont-ils alors vraiment le même niveau de sensibilité ;
- les scores sont attribués par les experts à la suite d'un compromis dont on ne connaît pas les conditions : tout le monde était-il d'accord ? Sur quel principe de préférence ?
- Les observations servant à l'évaluation peuvent être imprécises : comment le sait-on ? comment faut-il considérer un site dont l'évaluation serait très incertaine ? Est-ce que le diagnostic sera le même sur la base d'une information certaine ou incertaine ?
- Deux méthodes sont utilisées, l'addition de score et une approche mixte : est-ce qu'elles sont adaptées pour obtenir le résultat souhaité ? quelle est leur justification scientifique ? donnent-elles les mêmes résultats ? Peut-on imaginer et appliquer une autre méthode ?
- La méthode envisage pour certains critères des situations plus ou moins aggravées. Par exemple, on s'intéresse au nombre d'habitants touchés par une avalanche historique mais aussi à ce qui se passerait avec une augmentation de la distance atteinte de 5%, 10%, 20%. Est-ce que le différentiel entre le niveau nominal et le potentiel d'aggravation n'est pas un facteur de décision que l'on souhaiterait expliciter ?
- Les résultats recueillis représentent une masse énorme de données : peut-on réutiliser les résultats dans un autre contexte ?

2.3.4 La nécessité et la réalité des approches qualitatives

Les difficultés d'utilisation des modèles probabilistes d'estimation des risques

Les formulations du risque utilisées dans le cadre des risques naturels¹⁴ reposent logiquement sur l'utilisation de probabilités pour représenter les termes associés à la notion de fréquence. Le modèle de risque présente cependant des limitations et difficultés de mise en œuvre :

- Les probabilités associées aux phases de déclenchement de phénomènes tels qu'une lave torrentielle, à la formation d'un embâcle ne sont pas toujours accessibles sous une forme objective (fréquentiste) et restent souvent subjectives ;
- les valeurs de probabilités de dommages sont, dans la réalité, très difficiles à obtenir car résultant de la combinaison de plusieurs facteurs liés aux phénomènes et à la nature des enjeux. Pour que le phénomène atteigne l'enjeu, il faut qu'il se déclenche, qu'il se propage en fonction de facteurs dont il est difficile d'estimer la probabilité réelle ;
- l'évaluation des dommages doit être faite pour des dommages non seulement matériels sous forme monétaire mais aussi humains (blessés, morts). La vulnérabilité humaine pose un double problème : son évaluation sur la base de critères économiques est contestable et sa prise en compte est conditionnée par une présence potentiellement temporaire et mobile par opposition à une vulnérabilité matérielle permanente et localisée ;
- la relation de vulnérabilité structurelle associant dommages et intensité de phénomènes est mal connue scientifiquement ;
- l'efficacité des ouvrages et la contribution effective de mesures de protection en terme de réduction des dommages ne peut pas être caractérisée de manière indiscutable. De plus,

14. voir section 2.2.1, p. 26

à partir d'un état d'ouvrage nominal, le vieillissement, l'évolution du contexte peuvent induire des pertes de performance des protections.

Pour ces raisons, un modèle basé sur une expression probabiliste reste difficile à mettre en œuvre de façon concrète. Les probabilités ne résultent pas d'une approche objective et fréquentiste mais constituent seulement un mode de représentation de la méconnaissance. Quelques développements très récents ont réellement permis d'estimer un véritable risque dans le cadre des probabilités bayésiennes (Eckert et al., 2008b).

Au final, on peut donc avancer que beaucoup d'équations du risque n'ont qu'un rôle de support conceptuel. L'évaluation correspond en fait plus à une agrégation informelle de critères relatifs à l'aléa, l'intensité, la fréquence, la vulnérabilité sous forme de grilles d'analyse simplifiée. Dans l'esprit, on est ainsi très proche des analyses multicritères d'aide à la décision sans en reconnaître, ni utiliser explicitement les concepts. La question est donc de savoir si l'on peut et jusqu'ou ces méthodes peuvent être exploitées dans le cadre des risques naturels.

L'exemple de la détermination d'un niveau d'aléa dans le contexte torrentiel

Dans le contexte du risque torrentiel et à titre d'exemple, on peut évoquer le mode de définition d'un niveau d'aléa et la localisation de la limite de l'aléa de référence. Les éléments considérés pour la caractérisation de l'aléa restent très qualitatifs. Ils sont analysés au travers d'une grille croisant la fréquence (exprimée au travers d'une probabilité) et une intensité caractérisée grâce à des critères descriptifs. La notion de probabilité "potentielle" traduit bien la subjectivité et la réelle difficulté pour l'expert dans la définition de la fréquence des phénomènes, notamment en cas de laves torrentielles. (FIG. 2.25).

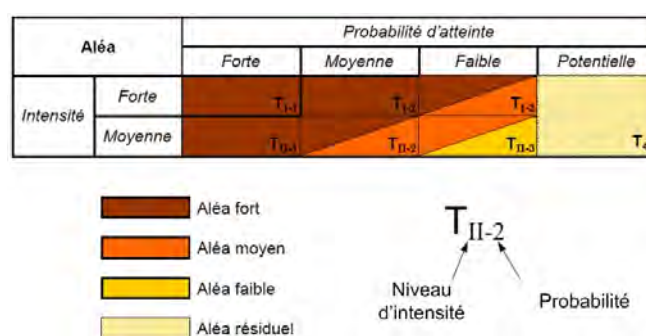


FIGURE 2.25 – Grille d'analyse du niveau d'aléa torrentiel (MEEDDAT, 2009)

La détermination de la limite du phénomène de référence se présente quant à elle nettement comme un arbre de décision (FIG. 2.26). La difficulté consiste ici à proposer une limite d'extension du phénomène réaliste. La limite externe du cône de déjection constitue l'emprise maximale possible du phénomène puisqu'elle correspond d'un point de vue morphologique à l'ensemble des zones où le torrent a déposé des matériaux au cours des temps géologiques. Considérer cette zone comme une emprise maximale correspond à une approche très prudente : elle induit cependant des restrictions d'occupation du sol sur des surfaces très importantes dans des zones souvent déjà très urbanisées. La difficulté est donc non pas de trouver l'emprise la plus large possible mais bien de définir quelle serait la zone de risque minimal.

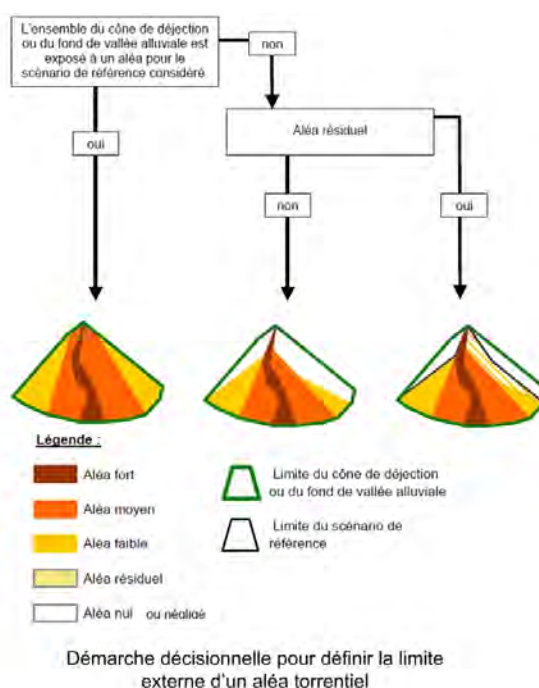


FIGURE 2.26 – Arbre de choix de l'emprise du phénomène torrentiel de référence (MEEDDAT, 2009)

Ces quelques extraits de la démarche de l'expert dans un contexte de zonage illustrent bien comment les experts sont conduits à analyser le risque pour proposer des mesures de gestion de l'occupation du sol, elles-mêmes considérées comme un des piliers de la stratégie de prévention contre les risques naturels en France.

Les enjeux sont donc de choisir une stratégie d'analyse du risque équilibrée permettant d'affecter les moyens d'investigation fortement limités sur les points les plus importants. Au final, la décision est forcément incertaine. Elle correspond au meilleur compromis autorisé par le niveau de connaissance disponible.

2.4 L'expertise, un vecteur d'appropriation perfectible

Dans ses formes classiques, l'expertise, mobilisée au niveau des différentes phases de l'analyse et de la gestion des risques, produit des résultats opérationnels mais s'avère questionnée par ses utilisateurs.

2.4.1 Analyser et gérer les risques : l'incertitude au cœur d'une double complexité scientifique et organisationnelle

L'incertitude et la complexité organisationnelle La complexité associée aux risques naturels provient d'une part de la nature physique des phénomènes mis en jeu mais aussi des modes et outils de gestion mis en œuvre pour réduire les risques. Sur ce dernier volet de nature organisationnelle, la complexité du dispositif de gestion des risques naturels en France a suscité un grand nombre de documents de synthèse et d'analyse (Bourrelrier et al., 2000, 1997). Les analyses comparées confirment la complexité des systèmes de gestion et mettent en évidence la diversité et l'hétérogénéité des approches (Peltier, 2005; Tacnet, 2004; Tacnet et Burnet, 2007). Dans une certaine mesure, l'organisation et ses lacunes peuvent induire une nouvelle forme de

vulnérabilité due non pas à la fragilité ou la sensibilité intrinsèques des enjeux mais plutôt à l'inadaptation et au manque d'appropriation des mesures de prévention mises en œuvre (Boudières, 2007). Il faut aussi évidemment évoquer les facteurs de vulnérabilité résultant souvent de défauts d'organisation des secours et correspondant à la phase spécifique de gestion de crise. Dans le cadre de ce travail, nous n'abordons ce volet qu'au travers de certains aspects de préparation à l'exclusion de la mise en œuvre effective des secours au cœur de la crise.

L'incertitude technique et scientifique source de complexité Le processus d'expertise d'un risque naturel gravitaire mobilise des compétences exploitant des sources d'information plus ou moins fiables produisant des informations variées et hétérogènes dans leur forme et leur qualité (FIG. 2.27).

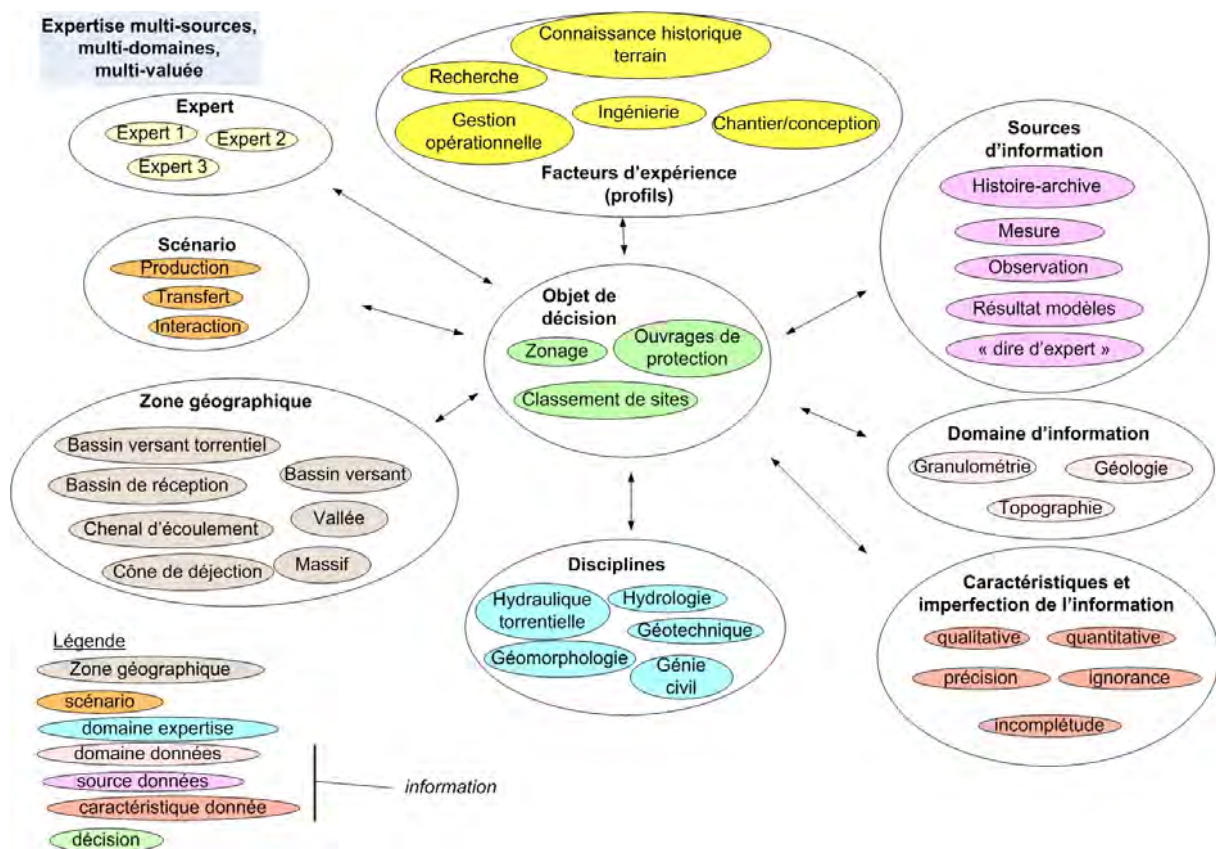


FIGURE 2.27 – L'expertise : un processus multi-sources exploitant des informations variées et hétérogènes

Dans ce cadre, l'expertise des risques naturels en montagne repose autant sur des analyses quantitatives "objectives" basées des mesures ou des données historiques que sur un grand nombre d'analyses purement qualitatives et subjectives basées sur des informations disponibles pouvant s'avérer incertaines et plus généralement imparfaites. Il est facile d'imaginer que la qualité de l'information conditionne les processus qui en dépendent, motivant la recherche de l'explicitation et de la prise en compte de ces imperfections. L'expertise demeure cependant un processus technique mobilisant des connaissances scientifiques. Il paraît intéressant de positionner l'approche de caractérisation de l'imperfection de l'information appliquée au domaine de l'expertise dans un cadre plus large d'évolution de la démarche scientifique.

2.4.2 L'incertitude concerne toutes les approches scientifiques, dont l'expertise

La connaissance scientifique s'organise classiquement autour de systèmes construits avec les objectifs d'expliquer, diagnostiquer, prédire, extrapoler dans l'espace ou sur une population pour ensuite décider, prescrire, contrôler, et planifier. Les systèmes reposent sur des relations entre des variables. Ces relations sont utilisées pour déterminer les états inconnus de certaines variables en se basant sur les états connus d'autres variables. Si les états inconnus sont déterminés de manière unique, le système est dit déterministe. Dans le cas contraire, il est dit non-déterministe et implique obligatoirement différents niveaux d'incertitude associés aux objectifs du système : incertitude de prédiction, de diagnostic Généralement, l'incertitude n'est pas acceptée et sa réduction est considérée comme un signe de progrès scientifique (Klir and Smith, 2001). L'avenir reste cependant imprévisible et il faut envisager des futurs : la prévision tente de dégager des certitudes et la prospective établit des anticipations dans des conditions d'incertitude qualitative et quantitative (Gonod, 2000)¹⁵. Il faut néanmoins des méthodes pour la prendre en compte : *"pour faire avec l'incertitude qualitative, d'abord il faut la reconnaître, ensuite, plutôt que de raisonner avec des probabilités, il faut stimuler la curiosité en multipliant les interrogations : qu'est ce qui arriverait si . . . ? . . . La connaissance des chaînes de processus serait très utile pour cet exercice, le renforcement du processus analytique est le support du processus créatif"* (Gonod, 1996).

Comme le souligne Edgar Morin (Morin, 1988), ceci constitue véritablement un enjeu pour la science :

"Beaucoup ont longtemps cru et peut-être croient encore que le défaut des sciences humaines et sociales est de ne pouvoir se débarrasser de la complexité apparente des phénomènes humains pour s'élever à la dignité des sciences naturelles qui, elles, possèdent des lois simples et faisaient régner l'ordre du déterminisme dans leur conception. Or, nous voyons aujourd'hui qu'il y a crise de l'explication simple dans les sciences biologiques et physiques ; dès lors, ce qui semblait être les résidus non scientifiques des sciences humaines, l'incertitude, le désordre, la contradiction, la pluralité, la complication, etc., fait aujourd'hui partie d'une problématique générale de la connaissance scientifique"

Cette problématique de l'incertitude prend aujourd'hui une place croissante dans les approches environnementales (Allard et al., 2008). Sur un plan plus général, le concept de science "post-normale" plaçant les incertitudes d'un système et les enjeux de décision au cœur de l'analyse a été proposé (Funtowicz and Ravetz, 1993; Ravetz, 1999). Les problèmes environnementaux se caractérisent par une information incertaine, des avis contradictoires, des enjeux importants et des décisions urgentes. Quand les connaissances académiques seules ne suffisent plus, la science devient post-normale (FIG. 2.28). Une exigence de qualité émerge alors non seulement sur le produit de la démarche mais aussi sur le processus d'obtention des résultats. La qualité du processus associant tous les acteurs apparaît comme essentielle pour produire une décision.

15. disponible sur Programme européen MCX - "Modélisation de la complexité - www.mcxapc.org

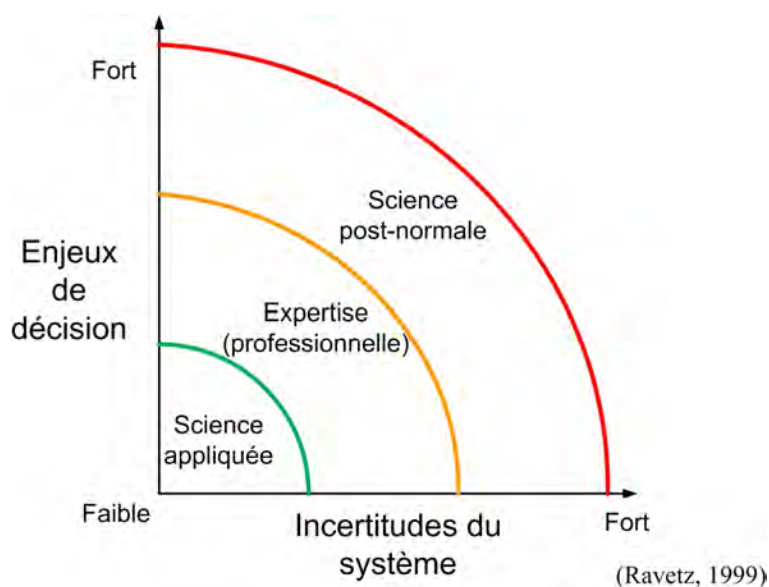


FIGURE 2.28 – Science appliquée, expertise et science "post-normale"

Le principe de précaution est conçu pour structurer l'action en situation d'incertitude scientifique dans les cas de dommages attendus graves et irréversibles (Kourilsky et Viney, 2000; Ewald et al., 2001). Il repose largement sur l'expertise à qui on demande d'appréhender les incertitudes sous une forme exploitable pour permettre aux gestionnaires de décider (Treich, 2000). Il s'applique par contre aux situations de risque diffus pour lesquelles la nature même des conséquences d'un problème n'est pas connue. La précaution se réfère à l'incertitude alors que la prévention se réfère à la notion de risque. Invoquer le principe de précaution dans le domaine des risques naturels¹⁶ au même titre que l'action préventive est discutable (Mongin, 2003).

En conclusion, l'incertitude et l'expertise sont intimement liées dans le cadre des approches scientifiques pour apporter des réponses opérationnelles. Les pistes de progrès concernent l'explicitation et la reconnaissance de cette incertitude.

2.4.3 L'expertise technique critiquée

La société exprime une crise de confiance dans la technique et les ingénieurs. Parmi les explications avancées figure le fait que la technique ne résout pas tous les problèmes et peut en générer de nouveaux mais aussi que les approches strictement techniques montrent leurs limites. L'ingénieur, l'expert et surtout le décideur doit prendre en compte les facteurs économiques, sociaux, environnementaux, juridiques et accepter ... des compromis. L'expert doit ainsi faire entendre, comprendre et accepter ce qu'il sait mais aussi ses doutes et son ignorance. Pour les faire accepter, l'expert doit quitter le domaine de la *matière* et entrer dans celui des *personnes*, des institutions et des normes culturelles pour contribuer à une décision démocratique (CGM, 2004).

Dans le contexte des risques naturels en montagne, l'expertise occupe une position ambiguë et variable entre une approche technique et la négociation portant sur l'évaluation du risque (Decrop et Charlier, 1997). Les outils et résultats tant techniques que réglementaires que l'expertise contribue à élaborer ne sont pas, à la base, des outils de concertation. Les travaux dans le domaine des sciences humaines et sociales abordent l'expertise et la gestion des risques naturels sous l'angle de la sociologie (Roqueplo, 1997) ou des sciences politiques (Gilbert, 1995; Brochot, 2001; Boudières, 2007). Ils démontrent le caractère imparfait des outils mis en œuvre. L'ensemble

16. préambule de la loi n°95 – 101 du 2 février 1995 dite loi "Barnier"

des travaux scientifiques est supposé aider à la décision mais le décalage entre l'expertise et la société est avéré. Dans ce cadre, ces auteurs critiquent la notion de défaut de perception imputé aux utilisateurs de l'expertise. Ce dernier aspect est symptomatique d'une vision orientée du problème : la société percevrait mal une définition et une formalisation du risque supportée par les approches réglementaires et fortement ancrées dans la conscience des ingénieurs et chercheurs travaillant dans le domaine des risques. La recherche travaille pour améliorer un schéma d'analyse et de gestion des risques qu'on ne discute pas obligatoirement. Les outils avancés (modélisation ou systèmes d'information géographique) sont même parfois des obstacles à l'appropriation des analyses de risques par la société "... *Le SIG (système d'information géographique) ou les modélisations ont paradoxalement plutôt nourri une simplification de la lecture du risque et conditionné une minorisation de la contradiction ... la technicité des outils de l'expert renforce l'étanchéité du jugement de l'expert ...*" (Canobbio, 2008). Les sciences humaines et sociales expriment donc le besoin de développement d'une vision constructiviste¹⁷ : les connaissances de chaque individu ne sont pas la copie d'une réalité externe imposée (vision réaliste) mais la re-construction, d'une réalité personnelle à partir des éléments qu'il a déjà intégrés et dont il faut, par conséquent, étudier les mécanismes et les processus.

Ces analyses ne sont pas complètement partagées, voire connues, dans le domaine de l'expertise des risques naturels qui agit plutôt dans une perspective *réaliste*. Il apparaît par contre important d'en accepter le constat et d'envisager une remise en question des pratiques pour améliorer certaines des lacunes constatées. L'existence même d'une frontière entre l'expertise et la décision peut être remise en question. Dans ce cadre, les experts ont conscience d'une part, de la nécessité d'explicitier leur raisonnement et d'autre part, d'associer les différents acteurs à leur démarche dans ce qui a été nommé des *scènes locales de risque* (Decrop et Charlier, 1997; Charlier, 1998). L'explicitation et la traçabilité de la démarche d'expertise apparaissent donc comme des moyens pour améliorer l'appropriation des résultats.

2.4.4 L'expertise doit répondre à des exigences de traçabilité

Un constat de manque et des besoins

Les plans de prévention des risques (*PPR*) représentent un enjeu majeur pour l'Etat, les collectivités locales et la population. La justice est également concernée par des contentieux principalement d'ordre administratif mais également pénal en cas de catastrophe (Tacnet et al., 2008). Ce dispositif n'est pas toujours compris et accepté par les acteurs dans sa forme et dans ses conclusions (Boudières et Marcelpoil, 2009). L'information occupe une place centrale dans la réalisation de ces plans de zonage et entraîne une forte exigence de traçabilité de la part de tous les acteurs (FIG. 2.29).

17. voir théorie constructiviste et travaux de Jean Piaget

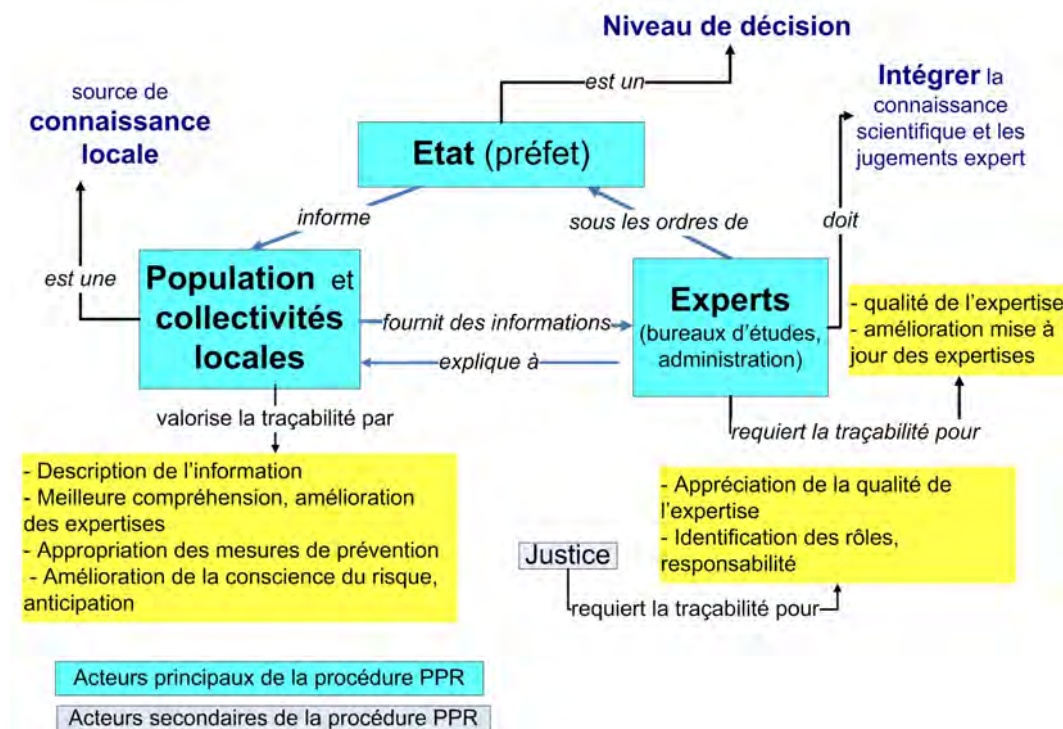


FIGURE 2.29 – L'information et la traçabilité sont au cœur de la démarche PPR

Des cadres et exigences normatifs pour la qualité de l'expertise

La normalisation du management des risques La description normalisée du fonctionnement d'une organisation peut se faire dans le cadre d'une *démarche qualité* (ISO, 2005). La norme *ISO 9001* (ISO, 2008) définit les processus comme *un système d'activités qui utilise des ressources pour transformer des éléments entrants en éléments sortants* et considère leur description comme une étape indispensable de la démarche qualité. Dans un contexte d'analyse des risques, la norme *ISO 31000* (ISO, 2009) définit le management des risques comme une partie du processus décisionnel tenant compte de l'environnement et des facteurs humains, définie de manière systématique et structurée, basée sur la preuve et explicitant l'incertitude et les causes de l'incertitude. De manière générale, le processus d'expertise des risques naturels est l'un des éléments constitutifs de la démarche globale de prévention des risques mise en œuvre par un système de gestion des risques associant les acteurs tels que l'Etat, les collectivités, les citoyens, les services techniques Le cadre général de l'approche normalisée semble donc constituer un cadre méthodologique approprié et justifie de s'intéresser aux méthodes préconisées pour expliciter les raisonnements et les processus. Engager des démarches qualité relative à l'expertise est d'ailleurs un objectif évoqué de longue date pour améliorer le dispositif de prévention des risques naturels en France (Bourrelier et al., 1997).

La normalisation de l'expertise Des exigences de traçabilité et d'explicitation sont clairement définies dans la norme NF X 50-110 (AFNOR, 2003) dont la figure FIG. 2.30 propose une interprétation graphique. L'évaluation de la qualité nécessite non seulement de décrire un processus mais aussi, et de manière essentielle, de fournir des indicateurs pour procéder à une évaluation. Le caractère opérationnel de la démarche qualité en dépend. Dans la problématique de l'expertise des risques naturels, on recherche ainsi à la fois à décrire le processus et à expliciter des indicateurs de traçabilité et de qualité de l'information.

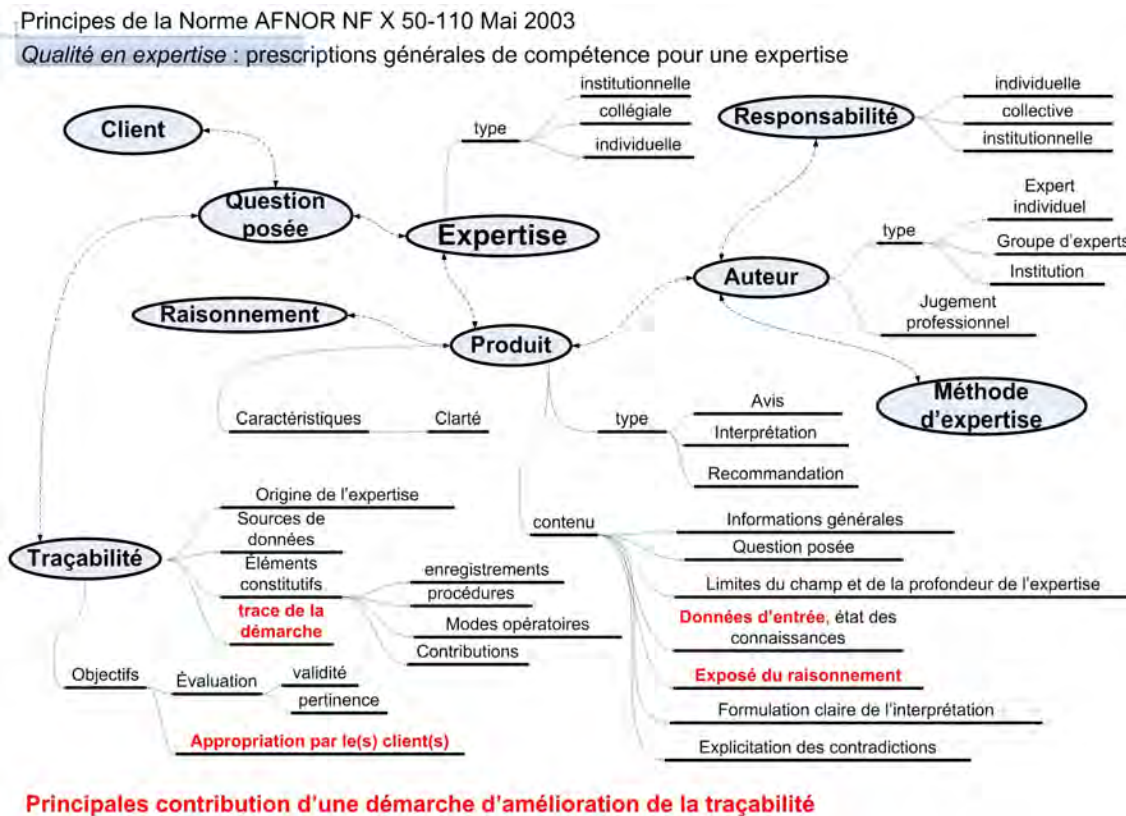


FIGURE 2.30 – Exigences de traçabilité selon la norme NF X 50-110 (AFNOR, 2003)

L'attente parfois paradoxale de la société

Les politiques et mesures de prévention des risques naturels n'empêchent pas les catastrophes et il arrive malheureusement que des dispositifs de protection ou des limites de zonage soient dépassés créant dégâts et victimes. La justice intervient alors pour évaluer les responsabilités des acteurs parmi lesquels figurent les experts ayant proposé ou participé aux choix des mesures de protection. Ces magistrats ont alors notamment à comprendre les incertitudes qui caractérisent les phénomènes naturels et la manière dont elles ont été prises en compte par les experts (Tacnet et al., 2008). Pour construire leur jugement, les magistrats vont envisager des critères relatifs d'une part aux pouvoirs et moyens disponibles et, d'autre part au contexte de l'accident (FIG. 2.31).

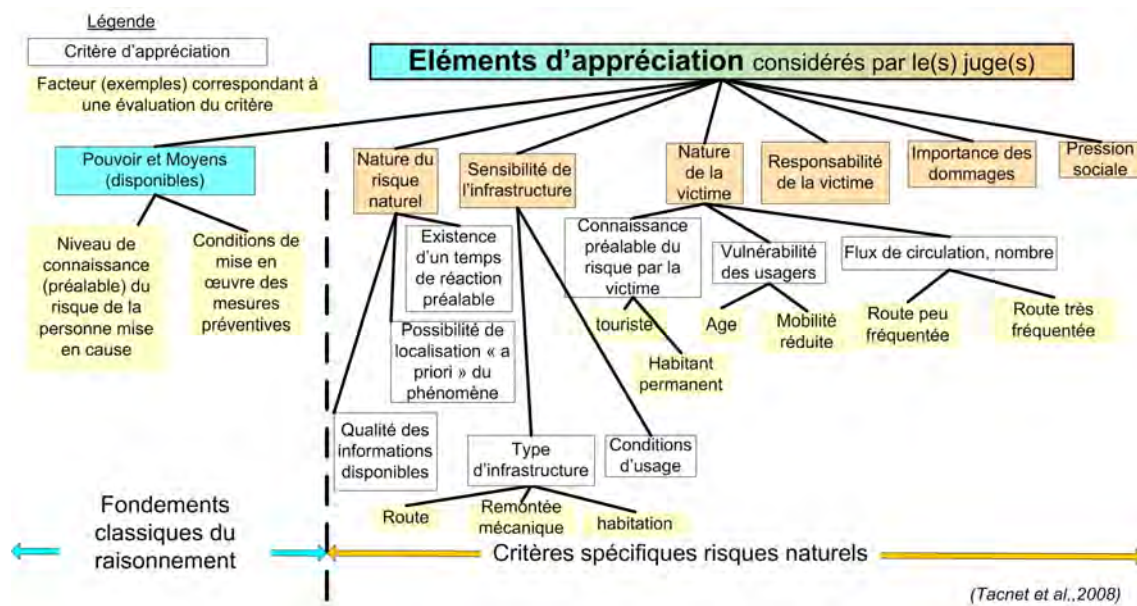


FIGURE 2.31 – Exemples d'éléments de raisonnement d'un magistrat dans un contentieux relatif aux risques naturels

Sans obligatoirement disposer de compétences et de connaissances spécifiques dans le domaine des risques naturels, les magistrats portent avant toute chose une appréciation globale sur le mode de construction de l'expertise et sur la qualité de l'explicitation des hypothèses, des informations disponibles et des raisonnements mis en œuvre (FIG. 2.32).

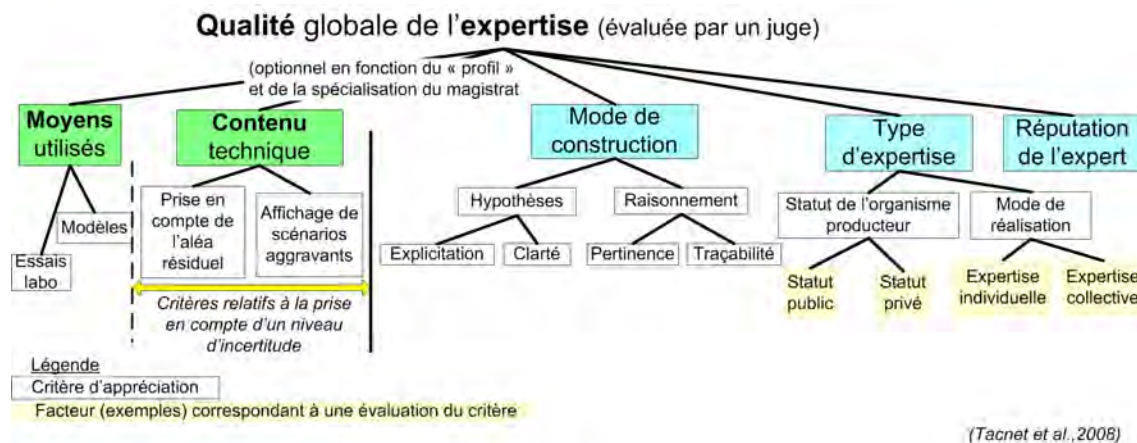


FIGURE 2.32 – Critères d'appréciation de la qualité d'une expertise par le juge

Les concepts d'incertitude et de probabilités sont facilement interprétés différemment selon les publics, amenant les techniciens à regretter un manque de culture du commun des mortels en matière de probabilités (Galland, 1995)¹⁸. La plupart du temps, l'analyse des risques se base sur des scénarios de référence que l'on essaie de caractériser en terme de périodes de retour en choisissant parmi des valeurs conventionnelles de 10, 100 ans ou plus pour certains grands équipements représentant des risques dits "acceptables" (Vrijling et al., 1998; Plattner, 2005). Une distinction doit ici être faite entre la comparaison de différentes extensions d'un phéno-

18. p.40

mène correspondant à des périodes de retour différentes (décennale, centennale) et l'intervalle de confiance attaché à l'estimation de ces limites¹⁹.

En pratique, dans un contexte d'incertitude, les juges attendent que les experts mentionnent systématiquement les multiples scénarios aggravants. Ils reconnaissent le principe d'un niveau de risque acceptable en soulevant toutefois un paradoxe quant à l'appréciation de cette incertitude : la limite d'extension d'un phénomène associé soit à une fréquence différente, soit à la borne supérieure d'un intervalle de confiance est considérée comme la preuve de la connaissance a priori d'un phénomène de cette ampleur : ” *vous saviez puisque vous mettez une limite* ”.

Communiquer sur l'incertitude n'est donc pas simple et l'affichage de l'incertitude, au sens large, peut être perçu comme une contrainte et une complication supplémentaire dans un contexte de décision déjà difficile. Les décideurs et la société reprochent ainsi facilement aux experts de se réfugier derrière leur incertitude pour ne pas prendre position (Beauzamy, 2008). D'un autre côté, l'explicitation de l'incertitude et de scénarios plus ou moins aggravés peut être un moyen pour mieux faire appréhender les limites de l'efficacité des mesures. Dans la forme, il n'est pas question d'abandonner les probabilités mais peut être d'explorer d'autres pistes basées sur d'autres représentations de l'incertain et des méthodes d'aide à la décision pour communiquer sur le risque.

2.4.5 L'objectif et les enjeux de la gestion intégrée des risques

Des modes de gestion des risques liés à l'incertitude

La procédure technique de gestion du risque a été décrite ci-dessus. On peut néanmoins s'interroger sur la pertinence et les lacunes de ce mode de gestion. Pour positionner la démarche d'évaluation et de gestion des risques dans le contexte des risques naturels, il est important de décrire et comprendre la diversité des attitudes et des approches existantes.

Les risques correspondent aux possibilités que les actions humaines ou événements conduisent à des conséquences dommageables pour les aspects ou choses auxquels les humains accordent une valeur. La sévérité du dommage dépend de la relation de cause à effet entre un stimulus (activité humaine ou événement) et les conséquences. Dans une vision non fataliste, les conséquences peuvent être changées en modifiant les causes ou en modifiant les impacts. La société est contrainte de supprimer, réduire ou au minimum de contrôler les risques quand les conséquences sont perçues comme majoritairement défavorables par la population. Pour réduire ou contrôler les risques, les institutions cherchent à évaluer et gérer les risques. L'évaluation est le processus selon lequel les agences, les groupes ou les sociétés déterminent l'acceptabilité d'un risque. La gestion du risque est le processus selon lequel la société cherche à assurer le contrôle, le suivi et l'information sur les risques (Klinke and Renn, 2002).

Trois principales stratégies d'évaluation et de gestion des risques peuvent être identifiées :

- les approches basées sur des seuils de risque numériques (objectifs quantitatifs de sûreté, limites d'exposition, normes ...) ;
- la réduction d'activités basée sur le principe de précaution (choix du seuil raisonnablement le plus bas, choix de la meilleure technologie disponible, confinement dans le temps et l'espace, surveillance des effets indésirables) ;
- Normes dérivées d'approches discursives, participatives basées sur des tables rondes, des médiations

L'analyse de risque est devenue une procédure de routine pour évaluer et gérer les dommages aux biens, personnes et à l'environnement. La légitimité de cette analyse de risque dans le processus de décision réglementaire fait l'objet d'un débat sur plusieurs aspects :

- l'opposition entre les visions constructiviste et réaliste du risque ;

19. voir un cas basique qui sème facilement le trouble chez des non-spécialistes en annexe D.1, p. 341

- la place accordée au public dans les décisions relatives à la gestion du risque ;
- les modes d'évaluation de l'incertitude ;
- la prise en compte de l'incertitude dans le processus de gestion (approche basée sur la science vs. approche de précaution) ;
- l'intégration optimale de la concertation dans le processus de décision.

Deux visions du risque s'opposent. La vision constructiviste du risque considère que le risque est une construction mentale qui n'a pas de valeur en dehors du groupe qui l'a produit selon sa propre logique. La vision réaliste du risque postule que les estimations techniques du risque correspondent à des représentations réelles des dangers observables. Ces dangers affecteront les personnes selon les prévisions calculées indépendamment des croyances, convictions des analystes impliqués dans l'évaluation. Pour les experts techniques, la vision philosophique constructiviste est absurde. Pour beaucoup de sociologues et de philosophes, la vision réaliste du risque est au mieux naïve et au pire impérialiste. En l'état, cette opposition est stérile et ne peut pas produire d'évolution ou d'amélioration des approches.

L'évaluation de l'incertitude est une autre source de débat dans le cadre de la gestion des risques. L'incertitude devrait être évaluée selon ses différentes formes (variabilité, indétermination, ignorance, manque de connaissance ...). La typologie de *Renn*²⁰ ((Klinke and Renn, 2002) propose une classification des situations à risque en fonction du niveau des conséquences, le degré de latence (risque déclaré ou caché), la nature polémique de l'évaluation (vision conflictuelle) et le niveau d'incertitude relatif aux effets. L'incertitude et le niveau de consensus sont donc des éléments essentiels de la description d'un risque. Les six types de risques retenus sont les suivants (Magne et Vasseur, 2006) :

- Damoclès : peu probable mais catastrophique. une des formes de gravité du risque (environnementale, financière, sanitaire, sociale ...) est catastrophique. La vraisemblance est faible mais il y a peu d'incertitudes. L'enjeu est de développer une protection effective par des études de danger ;
- Cyclope : la gravité est forte mais assez bien évaluée. La vraisemblance est mal connue ;
- Pythie : la vraisemblance et la gravité sont mal connues. La production et le partage de connaissances sont nécessaires.
- Pandorre : le risque est persistant, la vraisemblance et les facteurs de risques sont mal connus. Des effets dominos difficiles à analyser sont possibles. On cherche à améliorer la connaissance des facteurs de risques et de l'enchaînement des causes et des conséquences dans une approche pluridisciplinaire ;
- Cassandre : le risque est catastrophique, inévitable mais à long terme. L'enjeu est de développer la vigilance, d'adapter les organisations, de réduire les vulnérabilités et d'arbitrer les coûts de protection par rapport à une menace à long terme ;
- Méduse : le risque est de gravité moyenne, de probabilité faible ou moyenne, mais fortement controversé. Des actions participatives doivent permettre de traiter ce type de risque.

L'expertise des risques naturels s'inscrit principalement dans une vision réaliste du risque. Décrire les composantes du raisonnement et les facteurs qui conduisent à la construction du risque, y compris l'incertitude et l'imperfection de l'information, apparaît par contre comme un moyen pour établir un lien, un espace de discussion entre des visions qui s'opposent à la base. De cette confrontation peuvent émerger des approches nouvelles dans la façon de réaliser, d'utiliser les expertises.

Les formes d'intégration de la gestion des risques

Dans les cas de risques complexes correspondant à un contexte de risques naturels ou industriels, les analyses de risques sectorielles et disciplinaires sont insuffisantes pour décrire les risques

20. du nom de son auteur Orttwin Renn

globaux, à impacts multiples et indissociables du contexte social et économique. L'intégration de la gestion des risques est une forme de réponse. Plusieurs modèles de description d'approches intégrée de la gestion des risques naturels existent. Cette intégration peut être envisagée dans la perspective du développement durable. De nouveaux modes de gestion des risques sont proposés soit dans le cadre d'une vision durable (FIG. 2.33) intégrée de la gouvernance des risques (Renn, 2004; Renn and Graham, 2006) ou dans un cadre plus technique d'analyse transverse des risques (Magne et Vasseur, 2006).

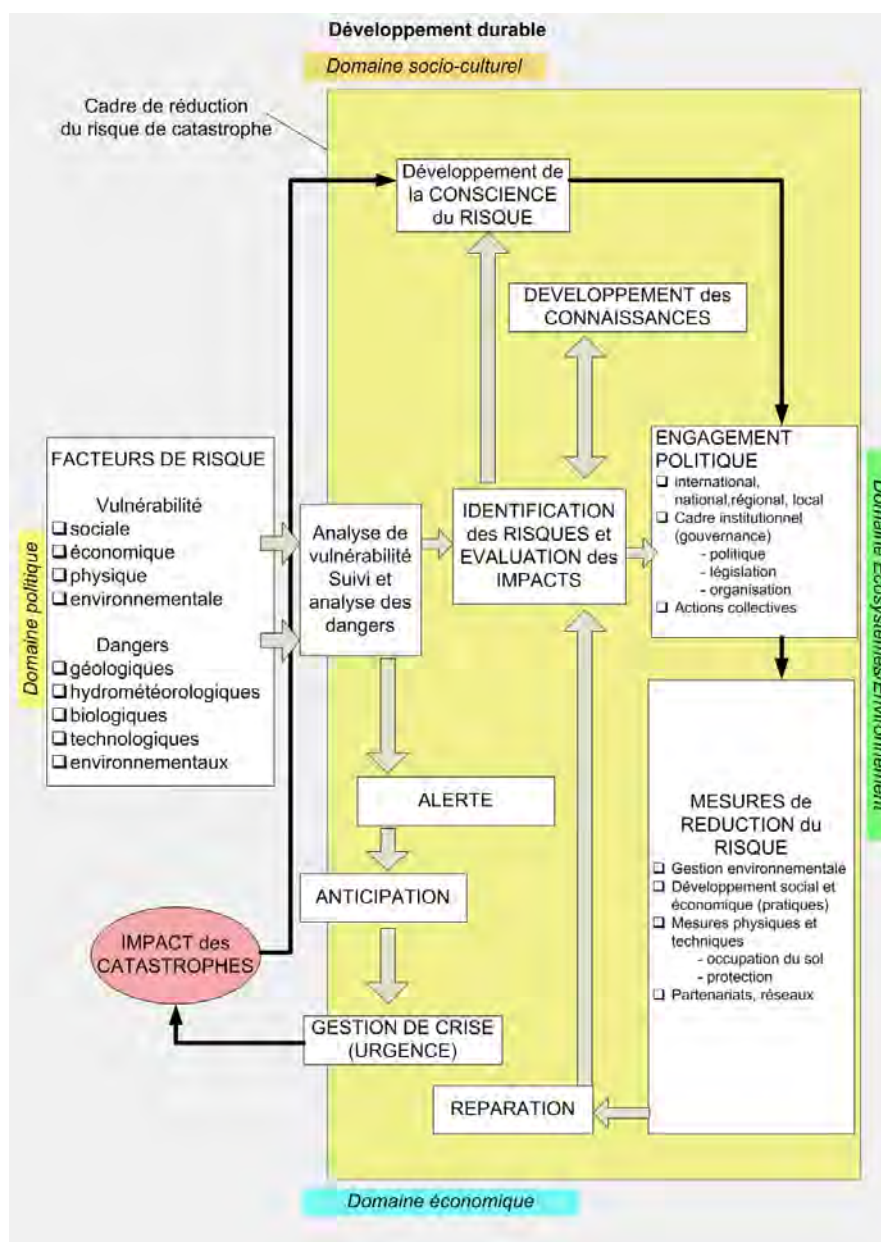


FIGURE 2.33 – La gestion intégrée et durable du risque (ISDR, 2004)

Cette vision globale de l'intégration n'est cependant pas évidente dans le domaine de l'expertise. Plusieurs échelles d'intégration s'imbriquent les unes dans les autres, des phases d'analyse sectorielles et thématiques du risque jusqu'à la gestion globale intégrée associant analyse et évaluation du risque et restant assez peu développée dans le domaine des risques naturels gravitaires rapides. Dans ce domaine, l'expertise concerne majoritairement la phase d'analyse de risque au

travers de l'identification des phénomènes (aléas) et de leur quantification : l'intégration est ainsi essentiellement une juxtaposition, coordination des résultats de différentes approches disciplinaires (géomorphologie, hydrologie,...).

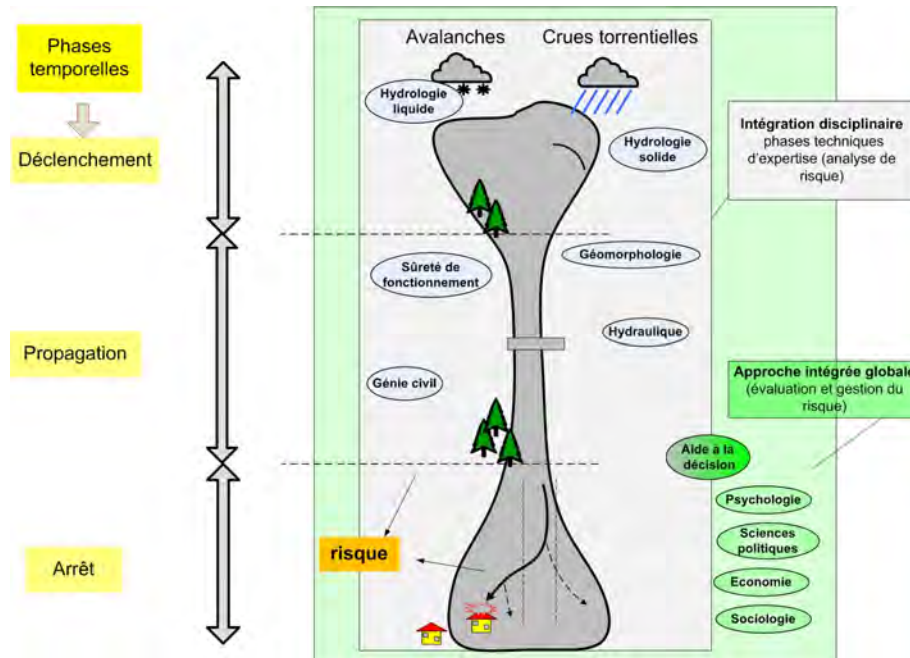


FIGURE 2.34 – Approche intégrée globale et expertise technique collective

L'aide à la décision envisagée dans un contexte d'incertitude nous apparaît comme un moyen d'intégration des approches entre analyse et gestion du risque (FIG. 2.34).

L'incertitude est centrale dans le choix d'un mode de gestion comme facteur de classement et d'augmentation du risque

L'incertitude comme base de classification. les problématiques de risque ont à supporter une part plus ou moins grande d'incertitude quant aux effets, conséquences dommageables des phénomènes naturels mais aussi à l'efficacité des mesures prises. Pour décrire les différents niveaux d'incertitude associés aux composantes d'un risque une classification²¹ (Klinke and Renn, 2002) a été proposée. Elle vise notamment à décrire les stratégies opérationnelles en analysant de manière croisée la gravité et la vraisemblance. L'incertitude est donc ici à la fois un facteur de classement mais aussi un élément de la décision. D'un point de vue opérationnel, cette méthode est mise en œuvre dans le cadre d'analyse transverse de risque (Magne et Vasseur, 2006).

L'incertitude augmente le risque et constitue un facteur de décision. associer ces deux concepts illustre l'une des difficultés de mise en place d'une approche intégrée du risque associant les phases d'analyse, d'évaluation et de gestion des risques. D'un côté, les approches formelles établissent des typologies des incertitudes en distinguant incertitude, imprécision, inconsistance et risque. De l'autre côté, la société considère le risque et l'incertitude comme une même réalité. Ce paradoxe illustre la difficulté et les contraintes pour la mise en place d'une véritable approche intégrée.

Dans le cadre de l'analyse de risque, Aven (2007) constate un intérêt croissant dans l'application de l'analyse et de la gestion du risque au problème de sûreté et de sécurité. Le risque

21. typologie de Renn

est défini par un croisement entre les menaces et les conséquences possibles. Les probabilités classiques utilisées dans cette formulation du risque et basées sur des fréquences relatives sont souvent totalement subjectives sans pour autant le reconnaître. Il propose de prendre en compte l'incertitude sur les conséquences comme un facteur de risque supplémentaire dans le cadre de l'évaluation : pour une conséquence potentielle donnée, plus l'incertitude augmente et plus le risque augmente. Dans le cadre d'une approche intégrée, l'évaluation quantitative des risques n'est donc plus suffisante. Elle doit être complétée par des méthodes plus proches de la décision.

2.5 Synthèse et émergence de la problématique de recherche

2.5.1 Le constat et les besoins

Le constat

L'expertise est un processus impliquant une série de décisions utilisées dans le cadre des phases d'analyse, d'évaluation et de gestion des risques naturels. Dans un contexte de connaissance imparfaite des phénomènes, elle repose sur des informations quantitatives et qualitatives, de natures incertaine et imparfaite, issues de nombreuses sources hétérogènes et parfois conflictuelles. La société exprime vis-à-vis de l'expertise des exigences de qualité et de traçabilité des processus basées sur l'explicitation des raisonnements. La technicité et la complexité des approches empêchent une réelle appropriation par les acteurs tel que l'envisage le cadre idéal d'une gestion des risques naturels dite *intégrée*.

L'expertise a un caractère générique Les risques naturels gravitaires rapides partagent un grand nombre de caractéristiques communes associées à leurs caractéristiques physiques et à la sévérité des conséquences sur les enjeux. L'analyse des composantes du risque et des raisonnements d'expertise met en évidence un caractère générique pour l'ensemble des phénomènes.

Mieux connaître les phénomènes ne suffit pas L'expertise permet généralement d'apporter une réponse technique majoritairement sur le volet de l'analyse du risque et de l'aléa. Cette démarche "*aléa-centrée*" est reconnue comme ne permettant pas une appropriation optimale de ses résultats par la société. Son apparence incontestable ne permet pas non plus de dégager l'espace de négociation et de discussion permettant de construire une décision collective. Dans le même temps, l'amélioration de la connaissance des phénomènes n'est pas non plus forcément en mesure de réduire les risques à elle seule. La tendance des catastrophes augmente en effet marquant le rôle essentiel de la connaissance de la vulnérabilité (White et al., 2001)²²(Weichselgartner and Obersteiner, 2002).

Le manque de traçabilité L'expertise est considérée ici comme un enchaînement de décisions basées sur des sources incertaines et des dires d'expert palliant les lacunes de la connaissance. De nombreuses applications et dispositifs opérationnels de gestion des risques en matière de zonage, de protection sont établis sur des bases que l'on sait incertaines et/ou imprécises. Par exemple, la méthodologie d'établissement des P.P.R.²³ s'appuie sur les connaissances existantes et repose sur des approches essentiellement qualitatives du type analyse historique, analyse morphologique Malgré leur caractère fortement empirique, ces pratiques s'avèrent assez efficaces. Elles présentent par contre des lacunes en matière de traçabilité des processus de décision. Leur qualité intrinsèque dépend fortement de la nature des informations disponibles et la compétence

22. "Knowing better and losing even more. . . "

23. Plan de Prévention des Risques (prévisibles)

2.5. SYNTHÈSE ET ÉMERGENCE DE LA PROBLÉMATIQUE DE RECHERCHE

du chargé d'étude. L'analyse a posteriori de tels documents s'avère plutôt difficile : comment peut-on déterminer le niveau de confiance associé à un processus de décision multiforme associant des approches qualitatives, quantitatives et soumis à une forte hétérogénéité des données disponibles ? Entre deux tracés sur des cartes de zonage de risque, comment peut-on différencier le niveau d'information et la qualité des sources utilisées entre celui qui, par exemple, découle d'une estimation à partir de critères géomorphologiques et celui qui correspond à des données historiques avérées, à une confirmation par un modèle ...

La réalité des approches qualitatives, subjectives, naturalistes L'expertise est mobilisée de manière transversale dans le cadre du système complexe de gestion des risques naturels. Elle s'avère indispensable aux différentes étapes de l'analyse et de la gestion des risques notamment pour pallier les méconnaissances scientifiques associées aux phénomènes naturels étudiés. Son rôle comme outil d'aide à la décision est donc essentiel. Pourtant, les formulations qu'elle exploite notamment au travers de la combinaison de l'aléa et de la vulnérabilité peuvent s'avérer purement conceptuelles. Dans la réalité, l'évaluation de ces grandeurs est souvent qualitative et basée sur une analyse croisée des composantes du risque.

Malgré des références techniques et scientifiques, l'expertise pratique des risques naturels mobilise une part de jugement subjectif et qualitatif. Ce jugement d'expert peut intervenir à deux niveaux. L'information et la connaissance peuvent être potentiellement disponibles mais non accessibles pour des raisons pratiques de délais, coûts et moyens. A l'opposé, il existe des situations où aucune étude ne permettra jamais de lever complètement la part d'incertitude associée à l'évaluation du phénomène et de ses connaissances.

Les besoins

Améliorer l'expertise : les bases d'une approche qualité Le processus d'expertise des risques naturels peut être considéré comme l'un des éléments constitutifs de la démarche globale de prévention des risques. Le système de gestion des risques peut être assimilé à une organisation dont on essaie de qualifier et décrire le fonctionnement dans le cadre d'une approche qualité. Les objectifs d'amélioration et d'explicitation du raisonnement s'inscrivent donc dans l'esprit et les principes d'une *démarche qualité*. Sans rentrer dans le formalisme et la rigueur imposée par une démarche complète de normalisation, la démarche proposée doit permettre de formaliser l'expertise en la considérant comme un processus d'une organisation constituée par le système global de gestion des risques.

Accepter la subjectivité, l'imperfection mais tracer les raisonnements L'expertise des risques naturels, associée aux phases d'identification des phénomènes et d'analyse des risques, apparaît comme un enchaînement d'avis, de choix (ou de décisions) dont la justification et la traçabilité restent souvent partielles. Malgré un solide ancrage de l'expertise des risques naturels dans le domaine des sciences physiques, les avis d'experts comportent une part d'appréciation subjective. Dans les nombreuses situations de gestion des risques associés aux avalanches et aux crues torrentielles, aucune solution ne peut ainsi être retenue de façon incontestable. L'imperfection fait partie du processus.

Pour mieux faire communiquer ces types de décision, des formes alternatives d'aide à la décision élargissant le cadre d'évaluation quantitatif des phénomènes sont nécessaires. L'aide à la décision relative à l'évaluation des composantes du risque doit pouvoir expliciter, tracer son raisonnement pour rendre plus accessible ses résultats. Il faut donc décrire le processus mais aussi l'imperfection de l'information et prendre en compte la diversité des avis exprimés, potentiellement contradictoires exprimés par les experts.

Développer des approches semi-quantitatives pour estimer le risque Il est proposé (Aven and Renn, 2009) de remplacer les approches strictement quantitatives probabilistes par des approches semi-quantitatives basées sur des comparaisons de scénarios dans les cas où l’incertitude est élevée : les phénomènes impliqués sont mal connus, les modèles n’existent pas ou sont connus pour être imparfaits, les hypothèses faites représentent de fortes simplifications, les données ne sont pas disponibles ou peu fiables, les experts expriment des avis contradictoires. La construction de scénarios répond à des exigences de logique, à des principes d’empathie avec les décideurs et acteurs, la cohérence avec les tendances passées et la plausibilité globale. L’incertitude liée à la connaissance peut être valablement décrite par des probabilités subjectives provenant de scénarios cohérents et plausibles quand les approches historiques ne peuvent s’appuyer sur des données suffisantes et que les intervalles de confiance perdent toute valeur.

Dans un contexte d’incertitude et dans l’impossibilité de définir précisément des valeurs de probabilités, des approches (semi)quantitatives basées notamment sur des scénarios co-construits avec les décideurs et acteurs nous semblent être des alternatives à développer dans le domaine de la gestion des risques.

Elargir le domaine d’aide à la décision L’activité d’expertise est liée à deux formes et contextes de décision. Les décisions internes concernent uniquement le cadre de l’expertise technique et gèrent l’incertitude et la méconnaissance des phénomènes étudiés. Les décisions de type externe mettent en jeu les acteurs de la gestion des risques et utilisent des résultats d’expertise.

Tout expert a déjà été confronté à une situation dans laquelle les arguments techniques qu’il a accumulés, produits, analysés avec soin se retrouvent finalement à jouer un rôle très partiel dans les décisions de gestion. Les impératifs sociaux, économiques, environnementaux conditionnent en effet largement les décisions. Dans bien des cas, l’expert va proposer une série de solutions ou de scénarios de phénomènes en demandant aux décideurs de choisir. Cette situation de choix entraînera souvent des comparaisons douloureuses et délicates. Il peut s’agir par exemple de protéger une zone avec un niveau de sécurité élevé en construisant un équipement de protection efficace mais avec par exemple des impacts sociaux importants en étant obligé de détruire des habitations, environnementaux en détruisant des zones fragiles A l’opposé, on peut imaginer un niveau de protection moindre mais en prenant conscience et en acceptant le risque résiduel (associé au dépassement des protections).

Ce choix reste cependant théorique. Dans bien des cas, le choix de vivre dans des conditions risquées, accepté et réclamé par des populations menacées, est difficilement toléré par les institutions ayant en charge la gestion des risques naturels. Cette contradiction est assez largement critiquée par exemple dans le cas de certains *PPR* (Canobbio, 2008).

Face à cette situation, la perspective d’une vision intégrée de la gestion du risque permet de mieux comprendre la place et les limites de l’expertise dans le processus de gestion. L’expert doit jouer son rôle en fournissant des éléments d’aide à une décision dont il ne sera généralement pas l’acteur principal. L’expert, parfois critiqué dans son approche quasi ”impérialiste”, méprisant les ”savoirs profanes”, n’est cependant pas toujours entièrement responsable. Il est généralement attendu pour ses conclusions opérationnelles. Pour apporter une réponse pertinente, encore faut-il que la question soit bien posée. Bien souvent, le rôle et la mission de l’expert restent insuffisamment définis (Brochot, 2001). Les experts reconnaissent que l’analyse des risques basée notamment sur des approches économiques ne constitue pas un outil d’aide à la décision efficace et suffisamment partagé avec les décideurs. Les méthodes d’aide à la décision multicritères apparaissent comme des outils de compromis à explorer et développer (Bischof, 2008).

Explicitier et améliorer les méthodes d’aide à la décision existantes Les différentes composantes de l’aléa (intensité, fréquence) et de la vulnérabilité sont souvent combinées de

2.5. SYNTHÈSE ET ÉMERGENCE DE LA PROBLÉMATIQUE DE RECHERCHE

manière qualitative. Cette agrégation, qui ne dit souvent pas son nom, reste assez sommairement décrite au travers de tableaux croisés tels que présentés par exemple dans les différents guides P.P.R. Dans le même temps, des méthodes empiriques utilisées pour évaluer des situations de risque peuvent être assimilées à des approches multicritères sans réelle référence à des méthodes classiques dans le domaine de l'aide à la décision. Il n'est pas non plus certain que ces approches et les méthodes utilisées pour synthétiser les évaluations des critères soient adaptées pour répondre aux besoins de gestion des risques. Dans le même temps, ces outils encapsulent un savoir-faire expert qui s'exprime dans la définition des classes d'évaluation, du choix des critères. Il faut donc analyser les méthodes existantes, expliciter, le cas échéant, les structures de préférence ayant conduit à leur conception. Un dernier enjeu concerne la réutilisation des informations recueillies en référence à une méthode. Il faut pouvoir caractériser la qualité de l'information et pouvoir la réutiliser dans d'autres contextes de décision.

Synthèse des besoins

Pour répondre aux objectifs et besoins identifiés, nous recherchons une forme alternative d'analyse des risques naturels selon une approche d'aide à la décision multicritères capable d'intégrer et prendre en compte l'incertitude, l'imperfection des informations et des niveaux de fiabilité variable des sources produisant l'information. Ce cadre méthodologique doit permettre d'explicitier le processus d'expertise, d'améliorer la traçabilité du raisonnement de l'expert et plus globalement la qualité de l'expertise. En tant que vecteur privilégié d'appropriation des risques par la population, les méthodes et résultats mis en œuvre dans le cadre de l'expertise doivent rester accessible et explicite pour les décideurs (Etat, collectivités) et la population.

2.5.2 Objectifs

L'expertise se positionne comme une réponse opérationnelle d'aide à la décision dans le cadre global de gestion des risques naturels. La description du cadre scientifique et technique de l'expertise a permis d'en identifier le contexte et les lacunes. Les informations utilisées dans le processus d'expertise proviennent souvent de jugements d'expert et s'avèrent imparfaites, incertaines, imprécises voire conflictuelles.

Développer une vision alternative de l'expertise

En se fondant uniquement sur la science et la technique, la vision réaliste peut empêcher toute remise en question des pratiques d'expertise. Dans une vision idéaliste, la science et la connaissance sont les piliers des décisions, vont obligatoirement réduire l'incertitude et améliorer du même coup le processus de gestion. Les critiques faites à l'encontre de l'expertise méritent une attention particulière. Est-ce que l'expertise émettrice d'information ne serait pas, du fait des méthodes qu'elle emploie, responsable du "déficit" de perception parfois regretté de la part de la cible (les utilisateurs, les décideurs, la population) ? L'expertise ne repose en effet malheureusement pas que sur des certitudes scientifiques et techniques. De nombreuses analyses et scénarios de risques naturels restent souvent très qualitatifs, subjectifs. Sans évidemment remettre en cause la nécessité des approches quantitatives classiques majoritairement probabilistes, la question de la pertinence et de l'efficacité d'une approche exclusivement basée sur ces principes est posée. Une alternative basée sur des approches d'aide à la décision est proposée.

Explicitier les liens entre information, décision et incertitude

L'expertise est considérée à la fois comme une forme d'aide à la décision produite par l'expert à destination des élus, pouvoirs publics, populations ... mais aussi comme un processus de décision interne à part entière dans lequel l'expert combine des critères pour identifier, quantifier

les phénomènes. Dans ce cadre, la question centrale concerne les relations entre l'information, ses différentes formes d'imperfection et la décision.

L'objectif global est de caractériser et prendre en compte l'imperfection de l'information dans le processus d'expertise de manière explicite pour aider à la décision, capitaliser les connaissances, les savoir-faire et favoriser l'appropriation des résultats dans le cadre d'une approche intégrée des risques. Ceci implique de décrire les formes d'imperfection de l'information, les cadres et méthodes d'aide à la décision et les théories de représentation et de traitement de l'information imparfaite. Cette approche mobilise plusieurs disciplines allant des sciences de la décision, à l'ingénierie des connaissances et aux théories de manipulation de l'incertain et de l'imprécis.

Démarche générale

Les hypothèses de départ de ce travail sont les suivantes :

- l'expertise repose sur la construction de scénarios techniques fortement influencés par la qualité et l'imperfection de l'information utilisée ;
- la construction de l'expertise associe et mobilise des connaissances et des informations qualitatives et quantitatives qui ne sont que très peu explicitées et tracées. Le cadre de décision associé est peu formalisé ;
- Les contributions techniques d'évaluation quantitative des composantes du risque sont importantes et incontournables. Elles ne constituent pas à elles seules de véritables outils d'aide à la décision capables d'intégrer la diversité des points de vue et des critères pris en compte dans le cadre des décisions de gestion des risques.

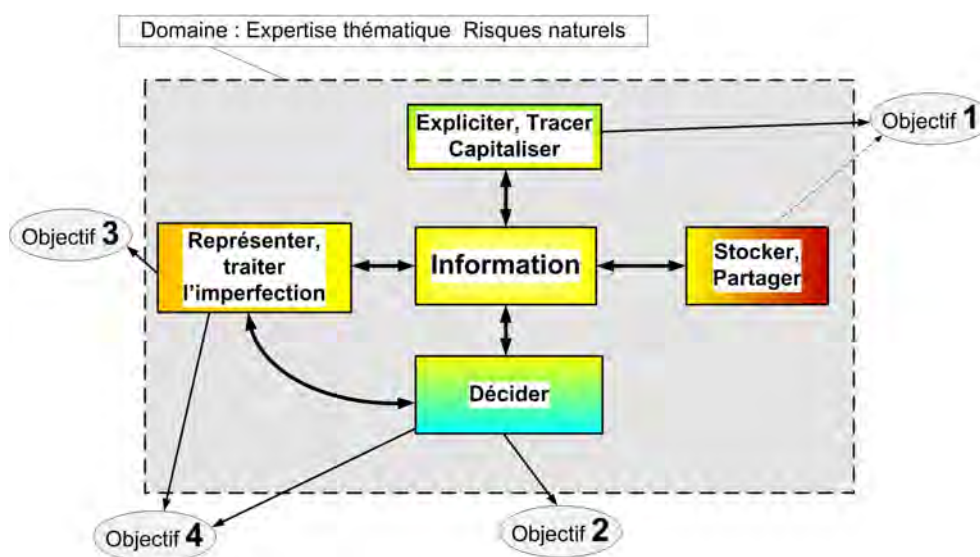


FIGURE 2.35 – La problématique comprend quatre objectifs centrés sur les liens entre information et décision

La démarche vise à capitaliser les connaissances, expliciter et améliorer les processus de décision associés à l'expertise des risques naturels en lien avec l'imperfection de l'information utilisée pour décider. **Quatre objectifs** sont identifiés (FIG. 2.35)²⁴ :

Objectif n°1 - Décrire et capitaliser l'information et les processus d'expertise. Il s'agit d'une part, de formaliser l'information et les concepts manipulés par des méthodes de modélisation conceptuelle puis, d'autre part, d'analyser les liens entre l'information imparfaite et

24. sans considération d'importance associée à l'ordre de la numérotation

2.5. SYNTHÈSE ET ÉMERGENCE DE LA PROBLÉMATIQUE DE RECHERCHE

la décision. Cette approche est envisagée dans la perspective d'une intégration dans des systèmes d'information. L'objectif opérationnel concerne la caractérisation de la traçabilité et s'inscrit dans le cadre d'une amélioration de la qualité intrinsèque des expertises et de l'appropriation des résultats par les utilisateurs des expertises.

Objectif n°2 - Décider dans le contexte des risques naturels et diagnostiquer des outils existants. Des applications d'aide à la décision existantes sont analysées pour, déterminer leur pertinence par rapport à l'objectif de décision, capitaliser la connaissance experte sur laquelle elles sont basées et enfin ré-exploiter les critères dans d'autres contextes de décision. Une première étape nécessite la description du processus de décision et des cadres et méthodes d'aide multicritères à la décision. Parmi les approches multicritères d'agrégation totale, l'analyse multicritères hiérarchique présente un intérêt a priori en permettant à la fois la formulation analytique d'un problème de décision et l'évaluation des préférences.

Objectif n°3 - Représenter et traiter l'imperfection de l'information. Dans le contexte de la gestion des risques naturels gravitaires en montagne, les formalismes théoriques permettant de manipuler l'information imparfaite (théorie des ensembles flous, possibilités et fonctions de croyance) sont explorés pour représenter le caractère imparfait, incertain de l'information utilisée pour la décision. L'objectif est ici de choisir et de combiner les méthodes permettant de prendre en compte l'information hétérogène provenant de sources multiples inégalement fiables voire contradictoires.

Objectif n°4 - Décider sur la base d'information imparfaite. On souhaite ici proposer une méthodologie capable de fournir une aide à la décision tout en prenant en compte l'imperfection de l'information. L'association de méthodes d'aide multicritères à la décision et de théories formelles de l'incertain ou de l'imprécis est une piste d'étude. Un des enjeux majeurs consiste à dissocier l'évaluation imparfaite des critères et son traitement dans le cadre du processus de décision. Cette indépendance garantit la traçabilité et le caractère réutilisable de l'information dans des contextes de décision variés.

Dans le cadre de ce travail, l'utilisation des méthodes suivantes est envisagée :

- la modélisation conceptuelle et ingénierie des connaissances pour décrire, tracer l'information et les processus ;
- l'aide à la décision multicritères pour expliciter les composantes du raisonnement expert, valoriser des approches d'aide à la décision existantes et développer de nouvelles méthodes de manière polyvalente ;
- les méthodes de représentation et de traitement de l'information imparfaite basée sur les nouvelles théories de l'incertain (théorie des ensembles flous, des possibilités et des fonctions de croyance) ;

Deuxième partie

Etat de l'art : Information et décision

Chapitre 3

Information, incertitude, risque et décision

Introduction

L'expertise des risques naturels porte, dans un contexte général d'incertitude sur les différentes phases de l'analyse des risques allant de l'identification des phénomènes à leur quantification en terme d'extension ou tracé, d'intensité, de fréquence puis enfin à l'évaluation d'un niveau de risque par confrontation avec les enjeux. Pour produire des décisions, elle exploite des informations plus ou moins incertaines, brutes ou élaborées (résultant d'un prétraitement) et provenant de sources matérielles (capteurs, mesures), humaines (dire d'experts) de fiabilité variable et pouvant être contradictoires.

Cette incertitude, au sens général du terme, doit cependant être redéfinie. Elle ne constitue en effet qu'une forme particulière des multiples imperfections de l'information. Pour expliciter et tracer les processus d'expertise, l'information doit être structurée pour la décrire sous des formes adaptées aux différents contextes de décision mais aussi envisager son intégration dans des systèmes d'information. Différentes méthodes existent pour modéliser l'information soit sous une forme statique décrivant les concepts et leurs relations, soit dans une vision dynamique associée aux traitements et à la production de nouvelles informations. Enfin, il s'agit également de décrire comment la qualité et la généalogie de l'information peuvent être, le cas échéant, intégrées et mises en œuvre dans un système d'information.

Ce chapitre aborde tout d'abord les liens entre la décision et l'information dont on décrit les différentes formes d'imperfection. Dans un second temps, les méthodes de modélisation conceptuelle de l'information sont décrites dans la perspective, non exploitée dans ce travail, d'une prise en compte de la traçabilité dans les systèmes d'information.

3.1 Qualité de l'information

Vouloir "prendre en compte l'incertitude..." ouvre immédiatement un champ d'investigation très large tant l'incertitude est un concept général évoqué dans des disciplines allant des domaines littéraires comme la philosophie aux sciences physiques en passant par les sciences humaines et sociales au travers de la sociologie, des sciences politiques. Dans le langage commun, l'incertitude désigne l'état de ce qui est soit indéterminé, inconnu, douteux, hasardeux, imprécis, vague (Dictionnaire Le Robert, 1993). . . . L'incertitude se réfère toujours aux aspects quantitatifs et qualitatifs de l'information. La décision est quant à elle étroitement liée à l'information disponible (France-Lanord, 2002) même si le choix du niveau d'information optimale conduit au *paradoxe de l'information* (Winter, 1975) : si un acteur décide de l'information à acquérir en arbitrant entre son coût d'obtention et l'utilité qu'elle lui procure, il a déjà besoin d'information préalable

pour faire ce calcul, qui doit elle-même être acquise. Pour prendre une décision, un agent va utiliser une structure de préférence et trois types de connaissances relatives à l'état du monde (son environnement) (Dubois et Prade, 2006)¹ : des connaissances génériques (expérience, formation scientifique), ses observations contingentes (des mesures, analyses réalisées spécifiquement pour le cas d'études) et des croyances (des interprétations, résultats de raisonnement)(FIG. 3.1).

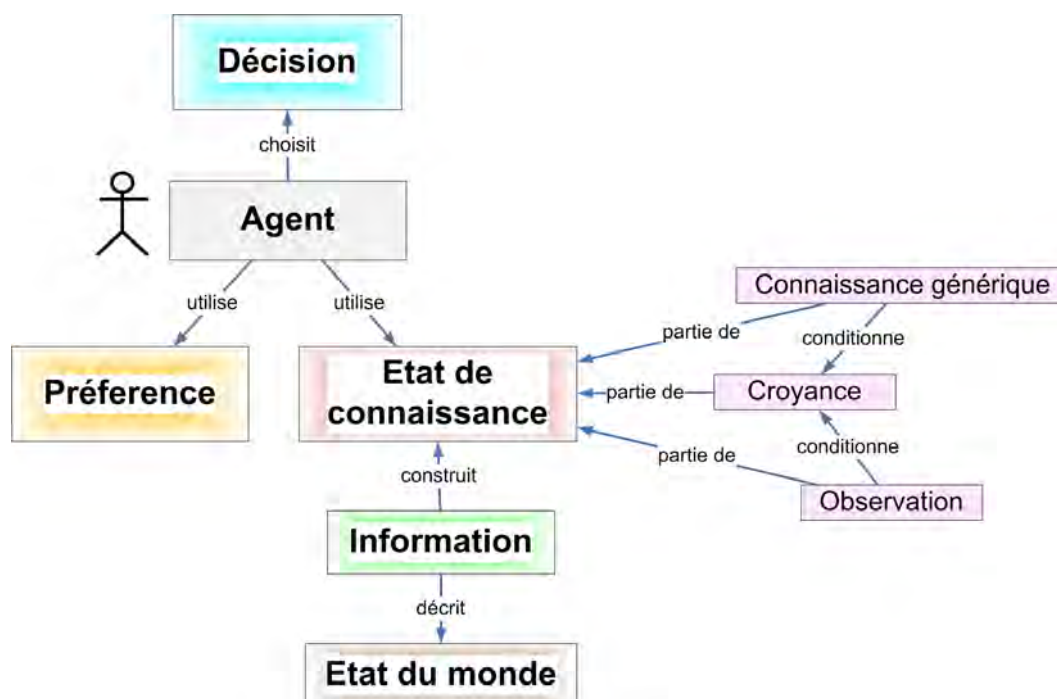


FIGURE 3.1 – La décision dépend des connaissances et des préférences

3.1.1 La valeur de l'information

La qualité de l'information dépend du contenu informationnel et de la forme selon laquelle l'information est formulée puis transmise. Une information tout à fait sûre et précise peut-être totalement inutile si elle ne correspond pas au contexte. Par exemple, on peut s'intéresser à la valeur de l'information délivrée par un prévisionniste (dans le contexte de la prévision hydro-météorologique) en direction d'un usager (Houdant, 2004). Deux types d'information ont une valeur nulle : celles qui correspondent à des tautologies et celles trop techniques qui ne sont pas comprises du tout. Une approche qualitative indirecte est suggérée pour estimer cette valeur : "en quoi l'information est-elle utile au fonctionnement du système?". Dans la suite de ce travail, on suppose que les informations utilisées dans le cadre de l'expertise, assimilée à un processus de décision, ont un sens pour l'expert, le décideur et sont pertinentes pour produire une décision. Sachant que "*Nulle donnée n'est parfaite*" (Masson, 2005), il s'agit donc d'analyser les principales formes d'imperfection de l'information et d'analyser comparativement les concepts de risque et d'incertitude.

3.1.2 Les formes d'imperfection de l'information

L'information est définie comme une "*collection de symboles ou de signes produits soit par l'observation de phénomènes naturels ou artificiels, soit par l'activité cognitive humaine et destinée à comprendre le monde qui nous entoure, à aider à la prise de décision ou à communiquer*".

1. p.114

avec des individus” (Dubois et Prade, 2006).

Le terme d’incertitude au sens général doit être abandonné au profit des termes d’ignorance ou d’imperfection de l’information (Bouchon-Meunier, 1995; Dubois et Prade, 2006; Smets, 1991, 1997). De nombreuses typologies ont été proposées² sans qu’un inventaire exhaustif soit possible ou qu’une typologie internationalement reconnue existe pour décrire le domaine de l’indéterminé (Smets, 1997; Magne et Vasseur, 2006). Les principales formes d’imperfection de l’information sont l’incertitude, l’imprécision, l’incomplétude et l’inconsistance (Smets, 1997). L’information supporte la décision et peut être de nature objective ou subjective notamment en fonction du type de source dont elle provient. Cette information a une forme qualitative ou numérique et son imperfection peut prendre plusieurs formes (FIG. 3.2).

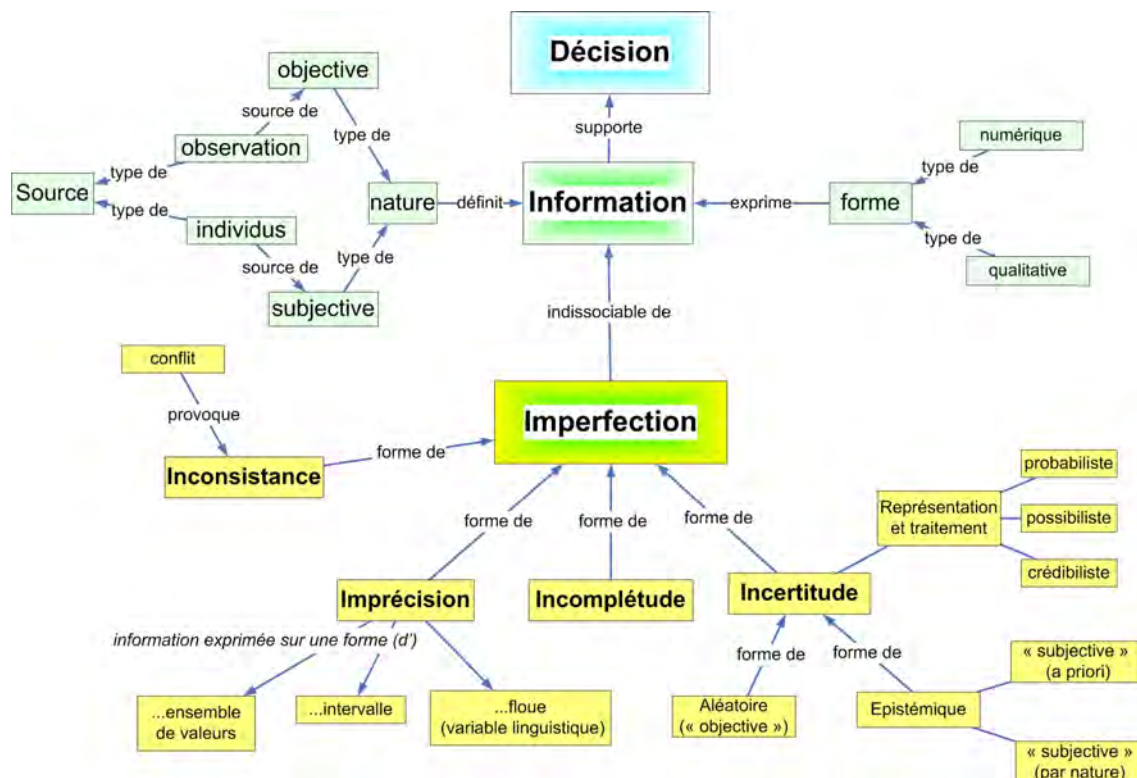


FIGURE 3.2 – L’imperfection de l’information conditionne la décision

Incomplétude

L’incomplétude correspond à l’absence de connaissances ou de connaissances partielles sur le système. Elle est systématique et inévitable à partir du moment où on s’intéresse à des échantillons mais peut aussi concerner la nature même de l’information. Par exemple, supposons une base de données contenant des informations sans erreurs sur la date de l’avalanche sur un site et l’altitude minimale atteinte par l’avalanche. Pour un site donné, la base de données contient l’information “avalanche le 3 février 1980” mais sans extension. L’information est incomplète (on ne connaît pas l’altitude) mais le reste est précis (il y a eu une avalanche) et certain (pas d’erreur dans la base).

2. voir par exemple l’annexe C.1, p. 339

Imprécision

L'imprécision concerne les cas où l'information est insuffisante pour permettre à l'agent de répondre à la question qu'il se pose. La description de la connaissance est imparfaite soit parce que les valeurs numériques sont mal connues par insuffisance des moyens d'observations, soit parce que le langage naturel est utilisé pour décrire de manière vague le système. Dans le cas de valeurs numériques, l'imprécision provient soit d'une insuffisance (pouvant provenir d'une impossibilité) des moyens d'observation (20000 à 40000 m^3 de dépôt d'avalanche), d'erreurs de mesures (largeur estimée à 10% près) ou de référence à des connaissances génériques variables (la densité de la neige varie de 100 à 500 kg/m^3). Le caractère vague provient de la forme linguistique employée (faible volume, grande vitesse, arrêt près du chalet) ou de référence à des catégories mal définies (intensité moyenne, avalanche rapide). En reprenant l'exemple de la base de données avalanche, on suppose que l'altitude est donnée par l'intervalle [1200 m; 1300 m]. L'information est complète, certaine (données réputées sans erreur) mais imprécise car il y a ambiguïté sur l'altitude exacte d'arrêt.

Incertitude

L'incertitude se réfère à l'état de la connaissance qu'a un agent (un individu, un système informatique) de la relation entre l'état réel de la nature et l'appréciation de cet état de la nature. L'incertitude est attachée à la validité (vérité) d'une information. L'incertitude peut elle-même être décomposée (Helton, 1997) en :

- incertitude aléatoire correspondant à l'incertitude résultant du comportement aléatoire d'un système également dénommée incertitude de type A, incertitude stochastique, irréductible, objective ou variabilité;
- incertitude épistémique résultant d'un manque de connaissances d'un système et liée aux agents analysant le système, également dénommée incertitude de type B, incertitude subjective, incertitude réductible, incertitude liée à la connaissance, ignorance.

L'incertitude épistémique est potentiellement réductible par le biais d'une acquisition de données supplémentaires³(Indrayan, 2002). Dans le contexte des risques naturels, l'incertitude épistémique est l'incertitude de modélisation due à une connaissance incomplète de la physique des phénomènes (Woo, 1999). L'incertitude peut également provenir de la fiabilité de la source d'information parce qu'elle n'est pas sûre d'elle ou qu'elle est susceptible de commettre des erreurs : *"je crois que l'avalanche est arrivée au niveau de cette route"*, *"la ligne de cassure de l'avalanche mesure 200 m"* (avis exprimé par un touriste non qualifié).

Inconsistance

L'inconsistance est une forme d'imperfection de l'information provenant d'informations conflictuelles. Elle provoque l'incohérence des conclusions. Par exemple, l'avalanche a touché le chalet à 15 h, elle s'est déclenchée à 15 h 10. Cette inconsistance peut provenir d'une source qui produit des informations contradictoires ou de plusieurs sources émettant des informations différentes sur une même situation : par exemple, l'expert A affirme *"le volume maximal de lave torrentielle sera de 1000 m^3 "*, l'expert B déclare *"le volume maximal de lave torrentielle sera de 20000 m^3 "*.

Liens entre imperfections de l'information

Des liens existent entre les imperfections de l'information. Les incomplétudes entraînent des incertitudes. Les imprécisions peuvent induire des inconsistances (cas d'un intervalle sur les altitudes d'arrivée avec une valeur supérieure à l'altitude de départ). L'incomplétude, liée à

3. Pour les phénomènes naturels, l'acquisition de ces données peut, en pratique prendre plusieurs générations

l'information existe indépendamment de l'observateur, peut être considérée comme une forme objective de l'ignorance. L'incertitude peut être une forme subjective d'imperfection de l'information dépendant de l'observateur. L'imprécision et l'incomplétude sont des notions relatives dépendantes du contexte de décision. La connaissance de l'existence d'une avalanche avec des altitudes d'arrivée imprécises peut être suffisante pour définir une cartographie des phénomènes observés dans une vallée mais insuffisante pour faire une analyse de risque détaillée. La sensibilité de la décision à l'imperfection de l'information dépend donc du contexte et des besoins. Ce qui est suffisant dans une configuration donnée ne le sera pas forcément pour tout type de décision.

Qualités de l'information et de l'expertise

Les qualités de l'information et de l'expertise sont liées, tout comme le sont l'information et la décision (FIG. 3.2). Les imperfections et notamment l'incertitude déterminent la qualité intrinsèque de l'information utilisée dans le processus d'expertise. Dans l'objectif d'une décision, il est nécessaire de franchir les étapes suivantes :

- définir la nature de l'information : comment peut-on décrire le domaine thématique d'application ? quels sont les objets sur lesquels l'information est recherchée ? Cette étape indispensable permet de formaliser et de structurer l'information qui sera exploitée dans le processus de décision et qui apparaîtra ultérieurement sous forme de critères dans les modèles d'aide à la décision. Il s'agit ici de définir explicitement les objets et concepts qui seront utilisés dans la suite ;
- regrouper les informations en fonction des raisonnements mis en œuvre. Il ne s'agit pas ici d'effectuer des traitements produisant de nouvelles informations comme dans un système expert mais de définir des ensembles homogènes d'information exploités dans les divers cadres décisionnels. Une même information peut évidemment être utilisée pour de nombreuses applications ;
- évaluer les informations par rapport à leur niveau d'imperfection est une étape indispensable et difficile dans le cadre des approches qualité. Des indicateurs explicites, quantitatifs ou qualitatifs, sont indispensables ;
- capitaliser les informations est une nécessité dans le cadre de la gestion opérationnelle des risques. Par rapport à notre objectif, cette capitalisation des données doit s'enrichir d'un volet permettant la traçabilité et intégrant la qualité de l'information en vue du stockage des informations. Comment peut-on attacher à une donnée des éléments décrivant la généalogie de l'information, sa qualité intrinsèque en restant inter-opérable avec d'autres systèmes d'information ?

Cette logique peut ainsi être rattachée à la thématique des risques naturels et à la caractérisation des composantes du risque (FIG. 3.3). Il s'agit ici non seulement de mettre en œuvre des approches disciplinaires pour estimer chacun des composants mais aussi de caractériser la confiance associée à chacune de ces informations en fonction de leur nature, de leur mode d'acquisition et de leur provenance. Une couche relative à la qualité de l'information et associée à la couche d'évaluation. Pour les informations résultat de jugements d'expert, des approches multicritères (représentées sous forme d'arbre) peuvent être imaginées pour décrire la qualité de l'information.

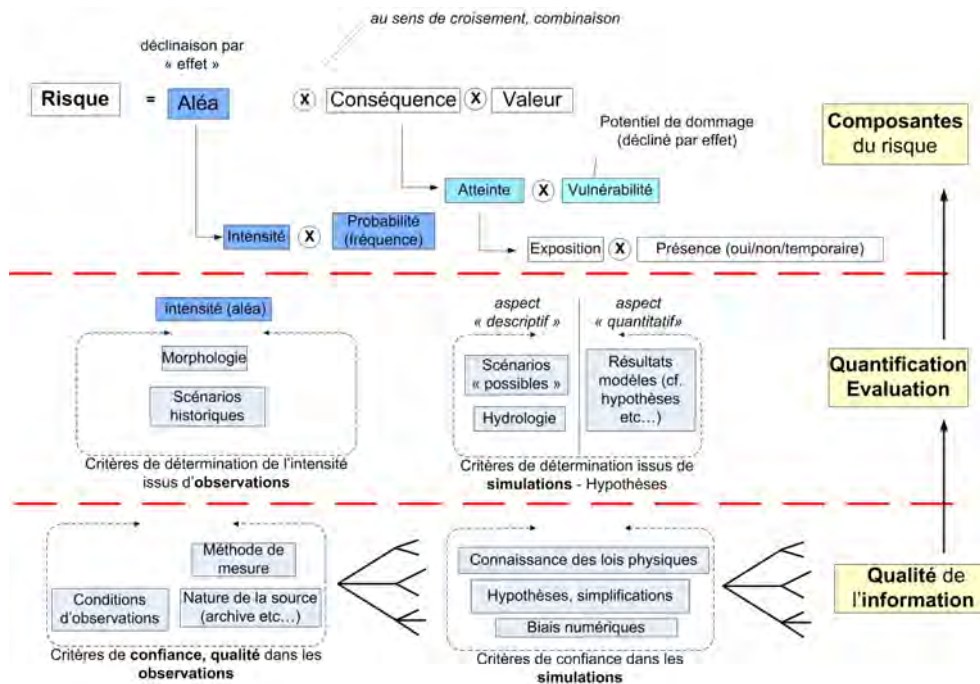


FIGURE 3.3 – La qualité de l'information impacte l'évaluation des composantes du risque

3.2 Représenter les processus et l'information

La décision repose sur une information qu'il faut expliciter, décrire et stocker aux différentes étapes du processus composite de l'expertise. Décomposer et structurer les problèmes de décision sont à la fois des moyens pour gérer la complexité du contexte mais aussi des objectifs pour garantir la traçabilité des raisonnements. La modélisation conceptuelle est une technique d'abstraction qui vise à structurer l'information ou les concepts et les relations pour comprendre, échanger, décrire des domaines et/ou des processus. Différents domaines ont développé des méthodes pour réduire la complexité des systèmes en vue de leur analyse et de leur gestion. Il s'agit notamment :

- de la sûreté de fonctionnement et fiabilité des systèmes (industriels) (arbres de causes, d'événements, de défaillance et de criticité, analyse de risques, méthode d'analyse des dysfonctionnements dans les systèmes (MADS)) ;
- de l'intelligence artificielle et des systèmes experts ;
- des méthodes issues de travaux en psychologie appliquée (*ACH*) ;
- des méthodes de planification (diagrammes de *GANTT*, *PERT*,...)
- du génie logiciel (*UML*) ;
- de l'ingénierie des connaissances (ontologies, cartes topiques).

3.2.1 Décrire des processus et des scénarios

L'expression et le choix de scénarios

La méthode *ACH*⁴ (Analyse des Hypothèses Concurrentes) (Heuer, 1999) a été développée à l'origine par la *C.I.A.* (Central Intelligence Agency) dans le cadre d'applications liées à l'analyse du renseignement dans les domaines de la sécurité nationale (terrorisme), de la justice et de l'intelligence économique (Wheaton and Chido, 2006). Ce n'est pas une méthode d'aide

4. Analysis of Competing Hypotheses

multicritères à la décision mais une démarche d'identification et de comparaison d'hypothèses sans a priori. L'utilisation de l'*ACH* oblige les analystes à expliciter leurs idées préconçues et à rechercher les incohérences dans les données qu'ils utilisent. Cette méthode vise notamment à écarter des hypothèses erronées pour éviter les biais dus à leur prise en compte dans le raisonnement. L'*ACH* est une méthode très logique fondée sur 8 étapes séquentielles selon lesquelles il s'agit de successivement générer les hypothèses de manière critique et contradictoire, lister les preuves et les arguments, créer des matrices croisant les hypothèses et les arguments puis de proposer des conclusions. Cette méthode pourrait tout à fait être mise en œuvre dans le contexte des risques naturels mais n'a pas été testée dans le contexte de ce travail.

Le cycle de l'information

Entre l'information brute et la décision, il s'établit un processus récursif d'élaboration de connaissances et de savoirs basé sur des raisonnements et des analyses emboîtés. Les données brutes sont intégrées dans des processus d'analyse et de traitement qui produisent des données élaborées ou résultats. Ces données élaborées constituent ensuite à leur tour des données initiales dans le cadre d'autres traitements qui produisent à leur tour de nouvelles informations A chaque niveau, les sources de données peuvent être plus ou moins fiables, précises. Les différentes formes d'imperfection de l'information (imprécision, incomplétude, incertitude et inconsistance) se retrouvent évidemment au niveau des différentes phases de l'expertise des risques naturels. Elles peuvent ainsi être déclinées de manière opérationnelle au niveau d'information brute mais aussi de scénarios d'évolution considérés comme des traitements élaborés (FIG. 3.4)(Tacnet et al., 2006a).

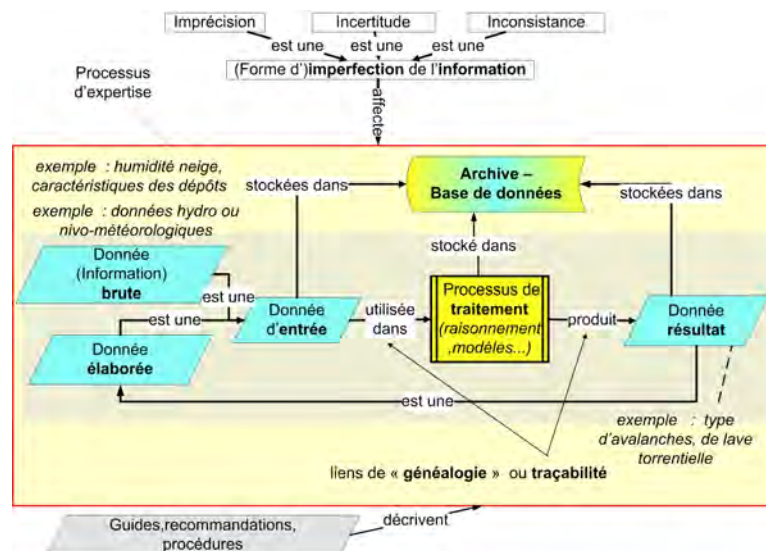


FIGURE 3.4 – Processus d'expertise et cycle d'information

Dans le cadre d'un tel cycle, une organisation rationnelle et cohérente de l'ensemble des flux de données est indispensable pour maîtriser l'ensemble car les données subissent de nombreuses transformations qui sont autant de sources d'erreurs. L'analyse des erreurs sur des données qui résultent de processus d'interprétation ou de modélisation du réel reste délicate en l'absence de référentiel pour garantir la validité des interprétations humaines. Les erreurs apparaissent inévitables et une démarche qualité pour un tel processus vise ainsi plus à contrôler l'ampleur et l'impact que de chercher à les éliminer complètement (Rivière, 2005).

Les méthodes de planification

Les méthodes issues de la gestion de projet telles que les diagrammes de *GANTT*⁵ et/ou *PERT* (Program (or project) Evaluation Review Technique)⁶ peuvent être utilisées pour représenter un enchaînement temporel de tâches et d'actions (Morley, 2002). A la base, un diagramme de PERT sert à déterminer le chemin critique d'un projet, en affectant des contraintes de début et de fin aux étapes du projet. Le chemin critique constitue l'enchaînement des tâches pour lesquelles aucun retard n'est tolérable. Une adaptation de ce schéma peut être proposée pour décrire les phases d'un raisonnement d'expertise en introduisant une composante spatiale. Les tâches sont ainsi positionnées non seulement par rapport à un critère temporel mais aussi spatial en fonction de la zone géographique à laquelle elles se réfèrent (Tacnet et al., 2006a). Par exemple, dans le cadre d'une carte de risques, notamment en raison de la méconnaissance liée à la vulnérabilité structurelle, deux types de raisonnement peuvent être rencontrés pour définir le niveau de risque : un processus quantitatif recommandé (processus n°1) mais aussi un processus plus empirique (processus n°2). Le niveau de risque sur une carte est le même malgré des cheminements différents (FIG. 3.5), d'où l'intérêt d'établir et de conserver la traçabilité des raisonnements et de l'information.

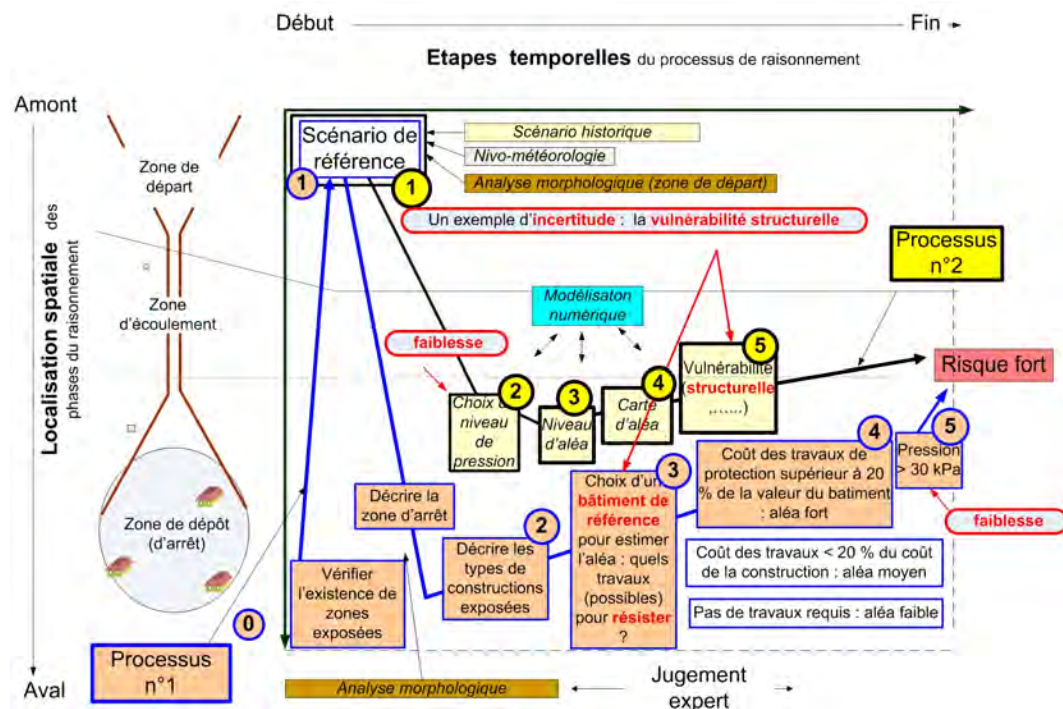


FIGURE 3.5 – Représentation de processus de raisonnement par un diagramme de PERT spatialisé

Cet exemple introduit la prise en compte d'un aspect spatial dans ces méthodes. Ce principe évident permet de dégager une structuration générique applicable aux différentes formes de modélisation conceptuelle : les causes et les effets peuvent ainsi être représentés dans le temps et l'espace.

5. du nom de son inventeur, Henry-Lawrence Gantt en 1910

6. inventé par la société Booz-Allen-Hamilton en 1956

Les méthodes de l'analyse des risques et de la sûreté de fonctionnement

Approches systémiques De nombreuses méthodologies d'analyse du risque proviennent du monde industriel notamment au travers des approches relatives à la sûreté de fonctionnement et à la fiabilité et l'on peut s'interroger sur les possibilités d'utilisation de ces approches dans le contexte d'expertise des risques naturels gravitaires. La sûreté de fonctionnement peut être définie comme la "*science des défaillances et des pannes*" mais aussi comme "*une approche de bon sens organisée et systématisée*". Elle repose sur une analyse systémique des problèmes et utilise des représentations arborescentes correspondant à des approches a priori par rapport à un événement redouté (arbres d'évènement ou de défaillance) ou d'analyse a posteriori (arbre de causes)(FIG. 3.6)(Mortureux, 2001) :

- L'arbre d'évènement décrit qualitativement les conséquences d'un évènement initiateur donné et représente l'ensemble des conséquences possibles pour par exemple analyser la gravité de défaillances ;
- Les arbres de défaillance décrivent a priori des scénarios conduisant à un évènement (ou effet) redouté. Ces méthodes inductives déduisent les conséquences et les situations résultantes à partir des défaillances élémentaires. On distingue :
 1. les arbres de défaillance qualitatifs de type *AMDE* (Analyse des modes de défaillance et leurs effets) ;
 2. les arbres de défaillance quantitatifs de type *AMDEC* associant des probabilités plus ou moins subjective aux évènements (Analyse des modes de défaillance, de leurs effets et de leur criticité)
- L'arbre des causes constitue quant à lui une représentation qualitative a posteriori des éléments d'explication d'un incident ou d'un évènement réalisé. Un arbre de cause peut être assimilé à un arbre de décision hiérarchique, l'évènement réalisé étant représenté par la décision (Forman and Selly, 2002).

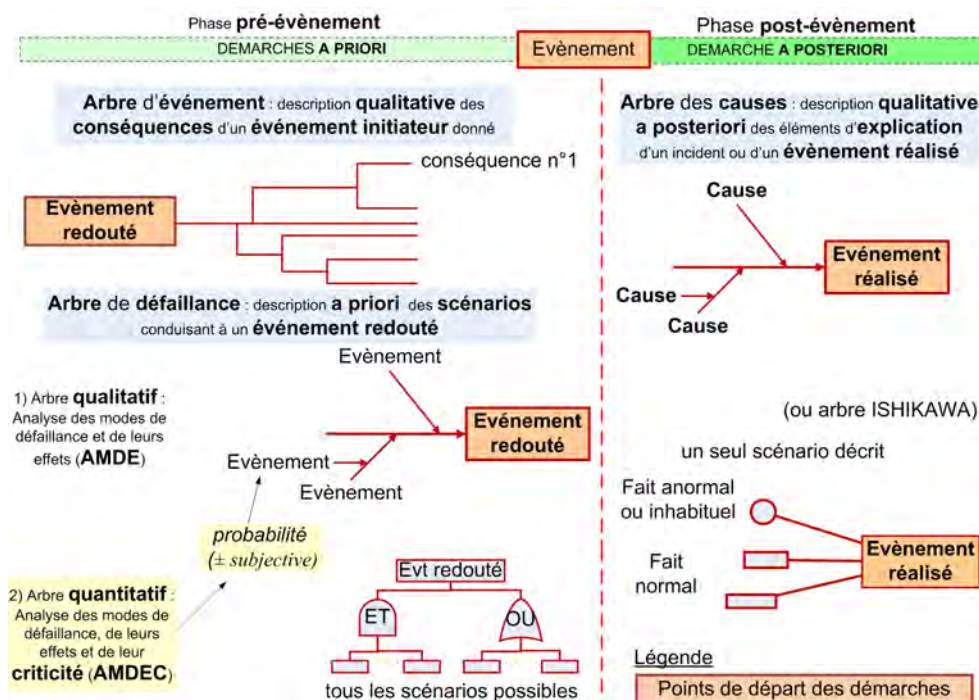


FIGURE 3.6 – Arbres d'évènement, de causes et de défaillance

Dans le domaine industriel, des méthodologies complètes de mise en œuvre ont été proposées : la Méthode *MOSAR*⁷ (Perilhon, 2003) (Perilhon, 2004) reprend les principes de la modélisation systémique. Elle décrit les différents scénarios de danger par modèle *MADS*⁸. Les différents formalismes mis en œuvre permettent d'appréhender la complexité et de proposer des solutions de gestion opérationnelles (Magne et Vasseur, 2006)⁹. Les méthodes d'analyse de risque couvrent le domaine du "risqué" (conséquences connues mais probabilisées) et de l'incertain (doutes sur la validité des connaissances) mais pas de l'ambigu correspondant à un contexte d'incomplétude.

Applicabilité au cadre des risques naturels Dans le domaine des risques naturels, les applications concernent des objets technologiques tels que les ouvrages hydrauliques (barrages, digues) (Peyras, 2003) ou des schémas d'organisation et de préparation des secours dans le cadre du retour d'expériences (Bourrelier et al., 1997)¹⁰ mais pas le processus d'expertise ou le phénomène en lui-même. Le principe d'une décomposition systémique est directement applicable au contexte des risques naturels. Par contre, autant il semble adapté d'utiliser ces approches pour analyser les défaillances associées à des ouvrages, autant les appliquer à un processus naturel apparaît discutable : Est-ce que la défaillance d'un système naturel a un sens ? comment la définir ? Comment définir le système associant le territoire, les phénomènes, les acteurs ? L'évaluation quantitative est également délicate notamment pour les arbres de défaillance quantitatifs (type *AMDEC*) qui utilisent massivement des probabilités pour caractériser la criticité des défaillances élémentaires et de leurs combinaisons. La détermination de ces probabilités reste une difficulté majeure dans le cadre de diagnostic réalisé à dire d'expert¹¹. Les méthodes basées sur l'ingénierie des connaissances sont alors indispensables pour caractériser numériquement les éléments du diagnostic (Curt, 2008).

Les systèmes experts

Les systèmes experts sont des outils qui exigent et reposent sur la modélisation des raisonnements dans le cadre de l'intelligence artificielle. Sur la base de règles prédéfinies et de bases de connaissances, ces systèmes exploitent des combinaisons logiques (classique ou floue) entre des propositions d'expert pour évaluer de nouvelles propositions résultant de ces propositions initiales (prémisses). Ce type de modèle a été développé dans les années 1990 dans le domaine des avalanches (Buisson, 1990, 1998). Quelques années plus tard, les retombées et l'intérêt de ces approches sont discutables. La connaissance experte mobilisée pour la conception de ces applications n'a malheureusement pas été capitalisée de manière indépendante. L'abandon des développements associés à la plate-forme informatique utilisée à l'époque a entraîné dans son sillage la perte de toute la connaissance experte. Les modèles génériques qui devaient à terme permettre d'encapsuler et d'intégrer les modèles relatifs aux risques naturels dans un même environnement (Cligniez, 1998) n'ont pas eu de suite non plus. Dissocier l'information de son utilisation dans le cadre de raisonnement et la pérenniser de manière indépendante apparaissent donc comme des exigences essentielles.

3.2.2 Modéliser et représenter l'information

La connaissance est définie comme une représentation cognitive ou mentale de la réalité pouvant exister sous forme tangible ou intangible. La modélisation conceptuelle se définit comme un processus d'extraction et de représentation des connaissances qui n'a pas de lien direct avec

7. Méthode Organisée Systémique d'Analyse des Risques

8. Méthodologie d'analyse des dysfonctionnements des systèmes

9. chap.11, p.343 et p.183

10. p.295

11. voir (Peyras, 2003)

la réalité (Wand et al., 1995). Les méthodes graphiques font partie des centaines de méthodes de modélisation conceptuelle existantes. Elles sont supposées faciliter la communication entre les analystes et les utilisateurs en validant la connaissance d'un domaine au cours du processus mais les évaluer empiriquement reste encore un véritable domaine de recherche (Parsons and Cole, 2005) tout comme le demeure la capture des connaissances permettant la production d'un avis d'expert (Magne et Vasseur, 2006). Ceci pose la question en tant que véritable problématique de recherche du partage, de la compréhension et de l'acceptation des formes de représentation des connaissances par les différents acteurs impliqués. De manière très basique, des représentations sous forme de blocs diagrammes reliant des concepts peuvent être utilisées en première approche pour décrire un domaine et structurer l'information (voir annexe B.1, p. 331).

Le langage *UML*

L'ingénierie des systèmes informatiques repose classiquement sur des phases d'analyse et de décomposition des problèmes en sous-problèmes (Meinadier, 2002)(Morley, 2002). Le langage *UML* (Unified Modeling Language)(OMG, 2005) définit une notation et un méta-modèle (définissant la dite notation). Plusieurs diagrammes (FIG. 3.7) permettent, de manière standardisée, de représenter notamment le fonctionnement externe d'un système (cas d'utilisation), les concepts principaux d'un domaine et leurs relations (diagrammes de packages, de classes) et les flux de données (diagrammes d'activités) (Fowler, 2002)(Rumbaugh et al., 1999). La modélisation repose sur une approche orientée objet qui décompose les concepts en éléments génériques dans l'esprit des approches systémiques. *UML* peut ainsi être utilisé aussi bien en phase d'analyse que de codage d'une application informatique. En formalisant la connaissance d'un domaine thématique, la modélisation *UML* est ainsi considérée comme un outil de capitalisation des connaissances (Miralles, 2006)¹².



FIGURE 3.7 – Exemple de diagramme *UML* : packages

Ontologies, cartes topiques et web sémantique La collecte et la description des concepts et des idées constituent la première phase de l'analyse d'un problème de décision et de la modélisation d'un domaine thématique (Barde et al., 2004). Une ontologie est une définition de termes, de concepts et de relations entre eux utilisés pour décrire un domaine de connaissance et partager l'information ainsi que son sens (Hicham, 2005). Ces ontologies¹³ sont à la base de la structuration de l'information dans le cadre du développement du web sémantique¹⁴(Berners-Lee et al., 2001). Le web sémantique permet d'accéder à une interopérabilité entre les données en représentant et en rendant exploitables par des machines, les relations définies au travers des ontologies. Il s'appuie sur des langages tels que *OWL* (Ontology Web Language) ou les cartes topiques (Topic Maps) qui exploitent le métalangage *RDF* (Resource Description Framework) permettant la description d'une donnée sous la forme d'un triplet ressource-propriété-valeur (Knublauch et al., 2004) : il est ainsi possible de décrire sous forme de graphes toutes les relations entre les informations qu'elles soient fonctionnelles, sémantiques . . . Ces syntaxes sont une

12. p.213

13. voir le principe en annexe B.2, p. 333

14. voir le site officiel <http://www.w3org/2001/sw/>

autre forme pour exploiter la traçabilité des concepts dans le cadre de systèmes d'information.

3.2.3 Stocker et tracer l'information

Les systèmes d'information ont longtemps été confondus avec des systèmes informatiques (France-Lanord, 2002) alors qu'ils font partie intégrante des outils de mise en place d'une stratégie de gestion de l'incertitude et de la complexité (Fievet, 2002). Les systèmes existants contiennent des informations pouvant être voisines et sont amenés soit à échanger des données, soit à servir de base pour la production de nouvelles données dans le cadre de l'intégration de systèmes (Meinadier, 2002). Les métadonnées constituent en quelque sorte la carte de visite des données introduites dans un système d'information décrivant la nature de l'information, sa provenance, sa disponibilité . . . Cette forme de structuration des données est essentielle dans le cadre de développements de systèmes d'information multi-utilisateurs ou amenés à fonctionner de manières interconnectées ouinteropérables. La production, la description de ces métadonnées notamment dans le domaine des données environnementales s'intègrent dans le cadre d'une normalisation à l'échelle européenne¹⁵. Deux utilisations des métadonnées sont importantes dans le cadre de l'amélioration de la traçabilité du processus d'expertise : le partage des terminologies et concepts, la généalogie des données.

Partager le sens des concepts

Le partage de la sémantique (sens) des concepts et des termes est la première étape pour échanger des données entre systèmes d'information mais aussi entre communautés scientifiques, techniques, socioprofessionnelles (Barde et al., 2004). La construction de glossaires et de thésaurus permet alors de décrire un domaine en décrivant les liens entre les concepts au travers de métadonnées décrivant les relations sémantiques. Plutôt que de vouloir unifier des vocabulaires, il s'agit donc ici de conserver les différences, qui ont une signification pour chacun des utilisateurs et sont rattachées à des entités géographiques particulières (FIG. 3.8).

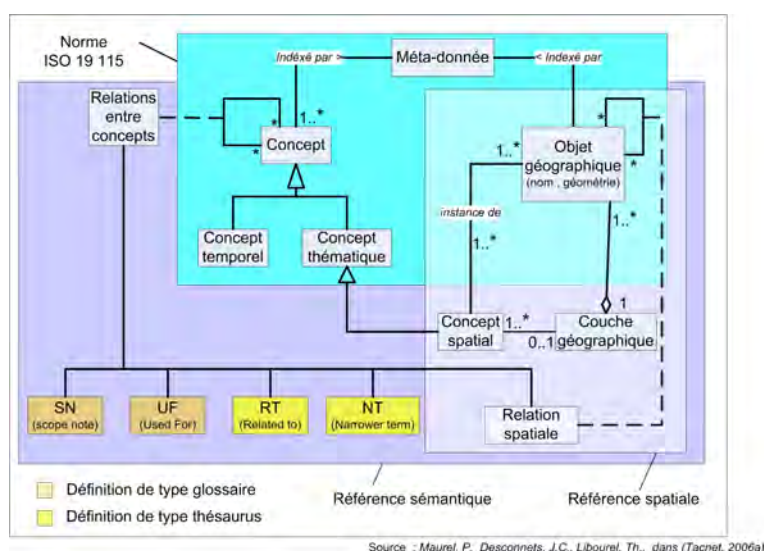


FIGURE 3.8 – Utilisation des méta-données en lien avec des référentiels sémantiques et spatiaux

15. Directive INSPIRE <http://inspire.jrc.ec.europa.eu>

Généalogie des données

Décrire la qualité et la généalogie des données constitue le second objectif auquel les méta-données peuvent contribuer. L'ajout de méta-données décrivant les flux d'information peut ainsi être proposé par extension du cadre des normes de la série 19 – 100¹⁶ (FIG. 3.9).

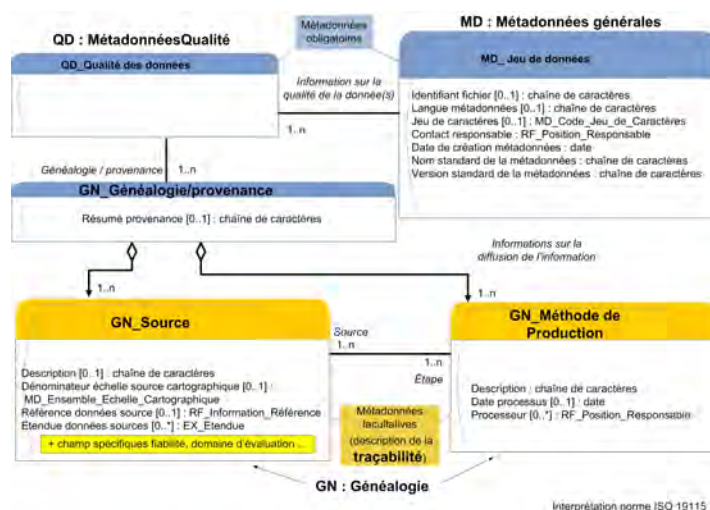


FIGURE 3.9 – Proposition de méta-données relatives à la généalogie des données

Associées à l'information manipulée au cours du processus d'expertise, elles permettent de décrire la qualité et la traçabilité de l'information. Les grandeurs et mesures utilisées pour évaluer l'imperfection de l'information peuvent ainsi être intégrées dans le cadre de systèmes d'information (FIG. 3.10).

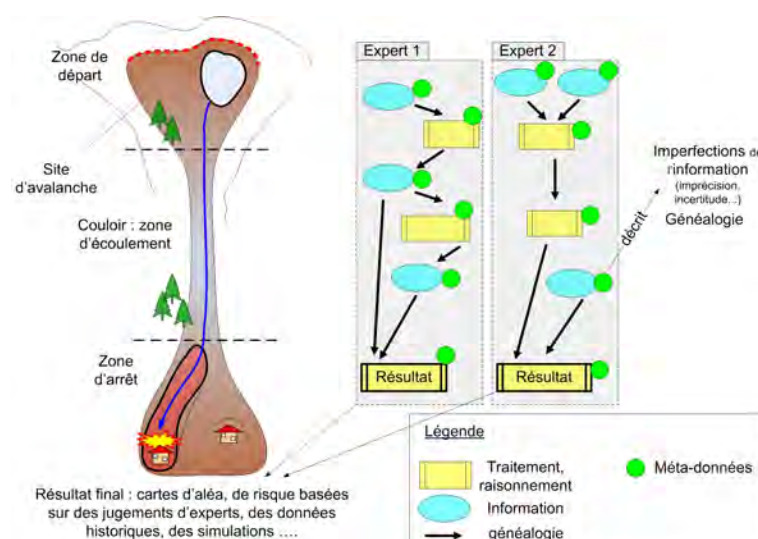


FIGURE 3.10 – Les méta-données, porteuses de l'imperfection et de la généalogie de l'information

16. Normes ISO relatives à l'information géographique

3.3 Conclusion partielle

Conclusion sur la modélisation conceptuelle de l'information

L'information, et ses différentes formes d'imperfection, conditionnent toute décision. Décrire et améliorer le processus d'expertise implique donc logiquement de s'intéresser à la représentation et au traitement de l'information imparfaite. La description de la traçabilité et de la généalogie des données au travers des métadonnées sont nécessaires dans le cadre d'une approche qualité globale du processus d'expertise. Pour décrire l'information et la structurer, les méthodes de modélisation conceptuelle sont des supports de raisonnement. La modélisation conceptuelle ne constituera pas un axe du travail et ne sera plus développée dans la suite. Elle est par contre essentielle dans la perspective d'une intégration des résultats dans des systèmes d'information et dans le cadre d'approches qualité. Les principales conclusions à son sujet sont les suivantes :

La modélisation conceptuelle reste un outil Pour décrire les volets dynamiques des raisonnements, les méthodes d'analyse des processus tels que les arbres de causes permettent de décrire les enchaînements entre les éléments de raisonnement et la décision selon un principe de décomposition analytique. La modélisation conceptuelle est un support indispensable pour décrire les concepts et leurs relations. Pour les approches exploratoires d'identification statique des concepts, des méthodes empiriques telles que des blocs diagramme peuvent suffire. Nous considérons que le formalisme doit être au service du raisonnement et non pas le contraire. Le formalisme des méthodes de modélisation (*UML* notamment) rend ces outils assez complexes pour les non-initiés et les différencie de véritables outils de communication qui demeurent indispensables. Dans le cadre de développements informatiques, la transcription dans des langages standardisés (*UML*, *OWL*) est nécessaire.

La mise en place d'une approche qualité rattachée au management des processus (ISO, 2008) motive et nécessite la description des éléments et des phases du raisonnement. La démarche proposée d'amélioration de la traçabilité et d'explicitation des raisonnements est donc cohérente dans le cadre plus global des démarches qualité et de management des risques. Elle représente un enjeu opérationnel majeur dans le cadre d'une approche qualité globale de la gestion des risques naturels.

Intégrer la qualité et la traçabilité des données dans des systèmes d'information reste une perspective opérationnelle incontournable pour stocker les données et garder une trace des traitements effectués. La description des relations entre concepts réalisés au travers de la modélisation conceptuelle trouve un prolongement dans le cadre des principes associés au web sémantique utilisée dans une démarche d'ingénierie des connaissances. Dans ce cadre, les métadonnées peuvent stocker et véhiculer les données relatives à la qualité de l'information et à leur traçabilité offrant ainsi une perspective concrète de mise en œuvre et d'exploitation des données. Les méthodes de modélisation conceptuelle et les systèmes d'information permettent donc de capitaliser des raisonnements et des informations décrites en terme de qualité et de généalogie. Il reste cependant à fournir des indicateurs mesurables de cette qualité.

Principes ultérieurs de prise en compte de l'imperfection de l'information

Dans la suite, nous nous concentrerons d'une part sur les formes et méthodes d'aide à la décision et, d'autre part, sur les modes de représentation et de traitement de l'information imparfaite, envisagés tout d'abord de manière séparée puis conjointe. Parmi les différentes formes d'imperfection susceptibles d'affecter l'information, nous focaliserons notre analyse sur l'incertitude épistémique, liée au manque de connaissances et aux jugements d'expert, à l'imprécision,

l'incomplétude et l'inconsistance. L'incertitude aléatoire ne sera donc pas prise en compte dans notre approche. Ces différents aspects sont abordés de manière suivante :

- le chapitre 4 (p. 83) décrit les théories et méthodes d'aide à la décision de la théorie classique de la décision aux approches multi-critères puis définit celles qui seront retenues dans le cadre de ce travail ;
- le chapitre 5 (p. 109) aborde les théories permettant de manipuler et traiter formellement les informations imparfaites ;
- le chapitre 6 (p. 131) analyse comment les méthodes d'aide multicritères à la décision peuvent prendre en compte l'imperfection de l'information. Il définit les principes des développements du chapitre 8 associant analyse multi-critères et fusion d'information.

Ces trois chapitres constituent une description de l'état de l'art que le lecteur spécialiste (maîtrisant les concepts des approches pré-citées) pourra éviter pour passer directement aux développements décrits dans la partie 3 regroupant les chapitres 7,8 et 9.

Chapitre 4

De la décision à l'aide à la décision

Introduction

Dans le domaine des risques naturels, l'expertise fournit des éléments pour les décisions dans le cadre de l'analyse et la gestion des risques sous une forme que l'on qualifie facilement d'*aide à la décision*. Dans ce cadre, les décisions portent sur des phénomènes incertains et se basent sur des informations et connaissances souvent imparfaites. Ces décisions peuvent donc se prendre sur la base de multiples critères dans un univers risqué ou incertain en exploitant des informations elles-mêmes imparfaites, incertaines. De nombreuses approches existent pour décider dans le risque ou aider à décider en prenant en compte un cadre multicritères. Décrire ces différents cadres permet de mieux positionner les formes effectives d'aide à la décision que traite l'expertise des risques naturels.

Historiquement, les méthodes d'aide à la décision sont issues d'approches d'inspiration économique dans le cadre de la théorie de la décision rationnelle fondée sur des approches probabilistes et un modèle de maximisation/minimisation d'une utilité espérée. Dans bien des cas, le caractère rationnel de la décision s'avère pourtant limité, l'esprit humain étant soumis à de nombreux biais cognitifs. Les méthodes d'aide multicritères à la décision abandonnent la notion d'optimum basé sur un critère unique et prennent en compte la diversité des critères de la décision sous des formes plus ou moins éloignées de la théorie classique.

Tous les moyens d'expertise mis en œuvre dans le cadre de la gestion des risques naturels pouvant être soit des modèles numériques, des typologies, des bases de données sont souvent considérés comme étant, de facto, des outils d'aide à la décision. En marge de l'arsenal technique développé à partir des progrès de la connaissance dans le domaine des sciences physiques pour quantifier les phénomènes, des méthodes alternatives plus ou moins empiriques émergent. Elles servent à comparer des sites à risques, choisir des stratégies ou tout simplement combiner les composantes du risque que l'on ne peut bien souvent évaluer que qualitativement. Elles répondent donc à une nécessité exprimée tant par les experts eux-mêmes que par les décideurs. Ils sont en effet souvent confrontés à des choix complexes que les approches classiques quantitatives ne permettent pas de satisfaire. Il existe donc un besoin pour légitimer, améliorer des approches d'aide à la décision existantes d'inspiration multicritères et en développer de nouvelles qui puissent prendre en compte l'imperfection des informations disponibles mais aussi l'hétérogénéité et la fiabilité variable des sources d'information.

Pour mieux positionner ces approches par rapport à l'état de l'art en matière d'aide à la décision, ce chapitre propose tout d'abord un rappel des notions essentielles relatives aux processus et méthodes d'aide à la décision en s'intéressant aussi aux travers de l'esprit humain en situation de décision. Il s'agit notamment de décrire les bases sur lesquelles se construisent les décisions pour mieux analyser les formes d'aide à la décision. Elle introduit en perspective les principes de l'aide multicritères à la décision à laquelle l'expertise peut être rattachée. L'expression des

préférences et les méthodes d'agrégation constituent des points clé qui différencient les méthodes entre elles. Les notions de décision en univers certain, risqué et incertain sont explicitées car elles peuvent générer des ambiguïtés quand la décision que l'on cherche à prendre concerne, comme dans notre contexte d'expertise, l'évaluation d'un niveau de risque. La terminologie usuelle est en effet ici une source de confusion : il est en effet possible de raisonner de manière certaine risquée ou incertaine quand on analyse les risques naturels.

Enfin, elle propose de choisir parmi ces méthodes celles qui permettraient de mieux considérer l'imperfection de l'information dans l'aide multicritères à la décision.

4.1 Contexte et processus de décision

4.1.1 Notion d'aide à la décision

La décision est un processus cognitif complexe qui associe à la fois des mécanismes de reconnaissance de situations connues et de raisonnement conduisant à proposer de nouvelles interprétations. Le premier type de décision correspond à l'esprit des systèmes experts : le diagnostic établi sur la base de règles ou de cas suffit à produire une décision. Le raisonnement est mis en œuvre pour se projeter dans le futur et/ou exploiter des informations trop nombreuses pour être traitées. La démarche consiste alors à concevoir des scénarios forcément simplificateurs et à choisir entre eux. La véritable façon humaine de faire ces choix multicritères reste par contre encore un mystère mais semble correspondre à un mécanisme d'inhibition des solutions possibles au profit de la solution finalement dominante (Pomerol, 2006).

Travailler sur l'*aide à la décision* entraîne immédiatement un certain nombre d'interrogations relatives à la personne qui va décider (qui décide ?), à l'objet de la décision (quelle est la décision à prendre ?) et au niveau de décision (individuel, organisationnel, inter-organisationnel). La notion de décideur et la rigueur associée aux décisions restent relatives. La décision réelle est en effet souvent générée par un processus chaotique dont on essaie de rationaliser les résultats a posteriori (Schärlig, 1985). Les décisions prises par les individus ou les organisations résultent souvent d'un arbitrage entre plusieurs objectifs exprimés par le(s) décideur(s). Cet arbitrage peut être un avis personnel et subjectif du décideur. Le processus dit d'*"aide à la décision"* peut ainsi être défini comme un processus explicite dans lequel le décideur exprime à la fois sa volonté et son mode opératoire pour aboutir à des arbitrages explicites et cohérents pour prendre la meilleure décision possible (Abdellaoui and Gonzales, 2006) .

L'aide à la décision se caractérise également par son caractère formel et abstrait provenant de l'utilisation d'approches qui permettent de réduire l'ambiguïté dans la communication humaine (Tsoukias, 2006). Ces langages sont abstraits et indépendants du domaine étudié. L'approche formelle correspond à l'adoption d'un "modèle de rationalité", abstrait et indépendant du domaine étudié (une hiérarchie par exemple). Les modèles de décision ne sont ainsi qu'une représentation parmi d'autres (Roy, 1985). L'utilisation d'un modèle abstrait et formel présente à la fois des avantages et des inconvénients tant au niveau de la modélisation des processus que des méthodes d'aide à la décision. Les avantages sont liés à :

- l'unicité du langage qui permet de parler le même langage et, a priori, d'augmenter la transparence du processus ;
- l'identification de sous-systèmes réutilisables ;
- la réduction des biais du raisonnement humain ;
- la réduction des erreurs dues à l'utilisation inadaptée de méthodes formelles.

Les inconvénients sont dus à :

- un manque d'efficacité par rapport à la communication humaine ;
- la réduction de l'ambiguïté signifiant aussi un appauvrissement de l'information initiale ;
- la perte d'inventivité imposée par une procédure factuelle.

4.1.2 Décision en univers certain, risqué et incertain

La problématique d'analyse des conséquences pratiques d'une décision dans un contexte d'incertitude est universelle et concerne des domaines allant de l'ingénierie à la gestion des risques financiers (Woo, 1999).

Dans un problème de décision, les actions représentent les solutions, décisions, objets que l'on essaie de choisir, ranger ou classer. Dans le contexte d'un problème de choix, les *alternatives* ou *actions potentielles* vont avoir des *conséquences*. Dans un univers certain, une alternative entraîne une et une seule conséquence. Dans des contextes risqués et incertains, les conséquences dépendent notamment de facteurs dénommés événements. Les événements élémentaires sont appelés *états de la nature*. Une action (ou alternative) est décrite par un couple (*événement, conséquence*) dénommé un *acte*. L'exemple de Savage (Savage, 1954) permet d'illustrer la notion de décision dans l'incertain et le risque. On souhaite faire une omelette avec 6 œufs. 5 œufs ont déjà été cassés dans la poêle. Il reste un œuf à casser et il faut décider d'une attitude sachant que l'œuf peut être bon ou mauvais (un état de l'œuf est un événement élémentaire ou état de la nature). Il y a trois alternatives ou actions possibles : 1) casser l'œuf dans la poêle directement, 2) casser l'œuf dans une assiette avant de le mélanger avec les autres pour le vérifier ou 3) jeter l'œuf à la poubelle. La décision consiste à choisir entre ces trois attitudes (alternatives possibles). Chacune de ces alternatives a une conséquence différente en fonction d'un état de la nature incertain (l'état de l'œuf) : perdre toute l'omelette parce que l'œuf est mauvais (1), salir inutilement une assiette (2) ou ne pas avoir assez d'omelette (3). Dans le cas de la décision dans le certain, l'œuf est bon ou mauvais mais on le sait. Dans un contexte de décision risqué, on connaît la probabilité que l'œuf soit bon ou mauvais. Dans un contexte incertain, les probabilités sont subjectives ou inconnues. Dans le contexte des phénomènes naturels, cet exemple peut être transposé sous la forme d'un choix à faire entre différents types de protection contre les crues torrentielles. L'état de l'œuf correspondant par exemple à un type (lave torrentielle, charriage) ou à une intensité de phénomène.

Les *préférences* du décideur sur l'ensemble des alternatives possibles sont contingentes à ses préférences sur les conséquences possibles de ces choix. Des analyses comparées des concepts d'incertitude et de risque ont largement été développées dans le cadre d'approches économiques en distinguant les situations de risque, d'incertitude et d'incomplétude (Ha Duong, 2004). Trois contextes de décision (FIG. 4.1) peuvent être identifiés (Abdellaoui and Gonzales, 2006) :

- décision dans le certain : quel que soit l'état de la nature, une action donnée a toujours la même conséquence ;
- décision dans le risque : une alternative donnée peut avoir plusieurs conséquences en fonction de la réalisation d'un événement ou d'un autre. Il existe dans ce cas une distribution " objective " de probabilité connue sur les événements. ;
- décision dans l'incertain : comme dans le cas "risqué", une alternative donnée peut avoir plusieurs conséquences en fonction de la réalisation d'un événement ou d'un autre. La différence provient du fait que les distributions de probabilité sur les événements utilisées dans la décision dans l'incertain sont subjectives.

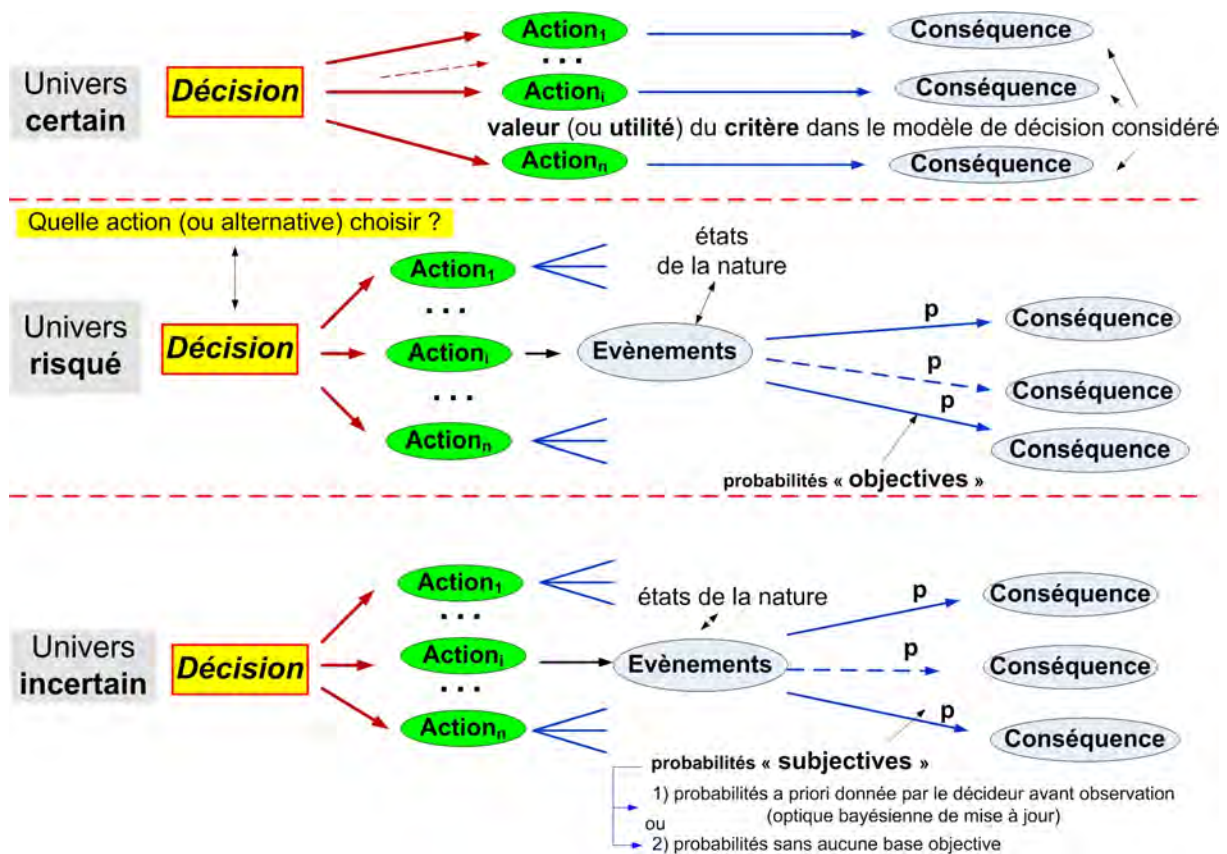


FIGURE 4.1 – Comparaison des contextes de décision en univers certain, risqué et incertain

4.1.3 Les limites de la rationalité et les biais cognitifs de la décision

Un comportement, une décision est généralement considéré comme rationnel pour celui qui l'adopte (?). La théorie de la décision a longtemps été limitée aux approches de décision dites "rationnelles" notamment en univers risqué avant une remise en cause progressive.

La décision rationnelle

L'ère de la rationalité La vision mathématique de l'aide à la décision reste aujourd'hui encore très présente. Pour un mathématicien, l'analyse décisionnelle n'est qu'une branche des probabilités appliquée à la prise de décision (Woo, 1999). Les méthodes d'aide à la décision ont cependant évolué en un demi-siècle (Tsoukias, 2006). Dans les années 1950, l'aide à la décision se limite à la recherche opérationnelle (programmation linéaire, puis programmation non linéaire et dynamique) associée au concept de "décision rationnelle" : le principe provient d'approches économiques basées sur l'optimisation sous contraintes d'une fonction objectif. Cette approche est développée par von Neumann and Morgenstern (1944) puis Savage (1954) pour prendre en compte les conséquences incertaines et risquées des décisions. Le modèle (de maximisation) d'utilité espérée pour la décision dans l'incertain est ainsi le premier à recevoir une justification axiomatique en termes de loteries probabilisées (von Neumann and Morgenstern, 1944) et en termes de préférences entre actes (Savage, 1954). Les travaux suivants ont fini de poser les bases de la théorie classique de la décision en proposant des fonctions "objectif" dépendant de plusieurs critères dans les cas certains puis risqués et incertains (Debreu, 1954; Luce and Tukey, 1964; Tribus, 1974; Keeney and Raiffa, 1976).

La remise en cause de la rationalité En situation réelle, le décideur n'adopte pas le comportement rationnel consistant à choisir la solution qui maximise l'espérance d'utilité de son gain : les motivations obéissent à une autre rationalité dite *limitée*. La mise en évidence de paradoxes logiques, conceptuels et empiriques¹ ont conduit à établir le caractère limité de la rationalité décisionnelle (Walliser, 1995). Une contribution essentielle est due aux travaux d'Herbert Simon dans les années 1950 qui établit qu'un modèle de décision n'existe pas indépendamment du décideur. Le modèle de rationalité doit être recherché dans le processus de décision et pas à l'extérieur. La rationalité externe est compatible avec un modèle d'optimisation mais pas avec un modèle défini de manière subjective. D'un point de vue pratique, selon H. Simon, cela se traduit par les analyses suivantes² :

- les décideurs n'ont jamais une idée très claire de leur problème ;
- les problèmes de décision se présentent souvent comme la recherche de compromis ;
- la solution d'un problème est soumise à des contraintes temporelles et de ressources disponibles.

D'autres travaux d'économistes (Allais, Ellsberg) mais aussi de psychologues (Kahnemahn, Tversky, Slovic) confirmeront cette rationalité limitée. Une synthèse complète de l'évolution de la théorie de la décision peut être trouvée dans (Tsoukias, 2006; Raufaste and Hilton, 2006; Pomerol, 2006) et en annexe E.3, p. 350)).

Les biais cognitifs

L'expertise des risques naturels, considérée comme un processus de décision est susceptible d'être victime des biais psychologiques classiques étudiés dans le cadre d'approches cognitives de la décision humaine (Pomerol, 2006) (Raufaste and Hilton, 2006) et rappelés ci-dessous :

- l'effet de la présentation correspond à l'aversion de choix risqués dans la zone de gains et une recherche de choix risqués dans la zone de perte mise en évidence dans la théorie des perspectives (Kahneman and Tversky, 1979) (voir annexe D.3, p. 342) ;
- l'effet de certitude est quant à lui un comportement attesté. Le choix certain d'un gain fixé à l'avance est toujours préféré à une loterie qui rapporte plus d'argent avec une probabilité $1 - \varepsilon$ et rien avec la probabilité ε ;
- la sur-confiance correspond à une surestimation de ses connaissances ou une sous-estimation de son incertitude. La plupart du temps, les sujets sous-estiment ce qu'ils ne savent pas ;
- l'illusion du contrôle du risque : les faibles probabilités sont mal appréciées par les humains. 10^{-3} semble être la limite au-delà de laquelle le risque est pris en compte. En dessous de cette valeur, le risque est accepté s'il s'accompagne de l'idée du contrôle (une attention particulière permettrait d'éviter le risque) ;
- l'effet de cadrage attribue une préférence injustifiée à une option en fonction des caractéristiques superficielles ou de la présentation du problème (voir annexe D.4, p. 344) ;
- le *frame effect* correspond à un effet mémoire selon lequel on hésite à reproduire une bonne décision quand elle correspond à une expérience désagréable dans le passé ;
- l'effet de récupération fait accorder plus de poids aux événements les plus récents ;
- l'ancrage de représentation accorde une probabilité plus forte aux événements qu'on se représente plus facilement ;
- l'ancrage narratif accorde un poids excessif aux scénarios qui sont bien décrits.

La confiance dans l'affect, défini comme un concept associé à la notion de bien et de mal, de bon et de mauvais, est un autre mécanisme cognitif complexe qui aide à répondre rapidement et concrètement dans de nombreux contextes de décision. Dans d'autres situations, l'affect conduit par contre à juger les probabilités et les conséquences d'actions de manière pénalisante (Slovic,

1. voir annexe D.5, p. 344

2. (Tsoukias, 2006)

2006).

Enfin, un dernier comportement concerne l'effet de groupe et les erreurs pouvant en résulter. Parmi les causes principales figurent l'excès de confiance, des gradients d'autorité dans le groupe, un déficit de communication et ... un excès de courtoisie professionnelle (qui tempère la remise en cause d'un collègue) (Sasou and Reason, 1999).

L'expertise des risques naturels est concernée par ces biais défavorables dans leur ensemble. Parmi cette liste de biais cognitifs, seule l'aversion pour le risque dans le gain peut être considérée comme un aspect positif du comportement humain, dans la mesure où elle entraîne une attitude prudente. Tous les autres biais et comportements sont à éviter et à surveiller, l'un des plus dangereux étant celui de l'illusion du contrôle du risque. Malgré tous ses défauts, le processus de décision humaine conserve cependant sa supériorité sur n'importe quel système de décision artificiel (Raufaste and Hilton, 2006). L'expertise des risques naturels n'a pas moins de raison que toute autre activité humaine d'échapper à ces travers. Les connaître est déjà un moyen de limiter les conséquences défavorables. Expliciter les avis, contradictoires ou consensuels, argumenter et décrire les décisions sont des garanties pour identifier les dérives.

4.1.4 Origine et nature de l'aide multicritères

Une alternative aux approches monocritère La notion d'aide à la décision a été introduite sous une forme multicritères suite au constat des limitations intrinsèques des méthodes d'optimisation. La recherche opérationnelle vise à trouver la solution d'un problème de décision au travers de l'optimisation d'une fonction objectif (par exemple le coût). Les limites de ces approches, datant des années 1945, ont commencé à être mises en évidence dans les années 1960, notamment dans les cas où les décisions de gestion ne pouvaient plus être isolées de leur contexte (Schärlig, 1985). Cette remise en cause se poursuit les années suivantes (Climaco, 2004) dans ce qui est qualifié de *crise de la recherche opérationnelle* (Bouyssou, 2003).

L'approche monocritère ne suppose pas que, dans la réalité, un seul critère intervient : elle considère seulement que l'on peut aider la décision en n'exhibant qu'un seul critère. L'aide multicritères à la décision, plutôt que l'aide à la décision multicritères (Roy, 1993), renonce à cette notion d'optimum et à l'unicité du critère de décision pour prendre en compte les multiples facettes d'un problème de décision réel : l'objectif est plus de trouver une solution acceptable et réaliste compte-tenu de l'environnement.

L'aide multicritères à la décision vise à fournir à un décideur des outils lui permettant de progresser dans la résolution d'un problème de décision où plusieurs points de vue, souvent contradictoires, doivent être pris en compte (Vincke, 1989). Cette démarche est justifiée par les analyses suivantes (Bouyssou et Roy, 1993) :

- les problèmes de décision les plus complexes et les plus conflictuels comportent toujours des *axes de signification* communs aux acteurs et servant de base à la justification, la transformation et l'expression de leurs préférences ;
- les critères permettent de gérer, dans chaque axe de signification, les éléments d'incertitude et d'imprécision et de mauvaise définition du problème ;
- la décision est toujours le résultat d'un compromis entre plusieurs objectifs conflictuels.

Un principe plus qu'une théorie Par essence, l'aide multicritères à la décision est condamnée à ne traiter que des problèmes "mal posés" traduisant la réalité du contexte de décision. La théorie de la décision classique base son approche sur une justification axiomatique rigoureuse. A contrario, la démarche d'aide multicritères repose quant à elle plus sur une *conviction* : la construction explicite de plusieurs critères n'est pas qu'une phase méthodologique mais joue un véritable rôle positif dans le processus de modélisation du problème et dans l'aide

effective à la décision (Martel, 1999). Cette démarche, évoluant souvent hors des problèmes mathématiquement bien posés est alors assimilée à une "manipulation", critiquée pour son "manque d'objectivité", sa "pseudo-scientificité" (Bouyssou et Roy, 1993).

4.2 L'aide multicritères à la décision

4.2.1 Méthodologie d'aide multicritères à la décision

La description des éléments d'un problème

Un problème d'analyse multicritères évalue des actions (ou solutions, alternatives) sur la base de famille de critères sur la base de modèles de préférences. Trois problématiques principales d'aide multicritères à la décision sont définies : choisir (α), trier (β) et ranger (γ) (FIG. 4.2) . La problématique de choix consiste à identifier la ou les meilleures actions, solutions ou alternatives. Le tri consiste à affecter les alternatives à des catégories préalablement définies. Le rangement consiste à les ordonner selon des classes d'équivalence conformément aux préférences des décideurs (Schärlig, 1985; Roy, 1985). Cette distinction ne s'applique pas aux méthodes d'agrégation totale, inspirées des méthodes d'optimisation monocritère, qui établissent un classement pouvant être interprété en termes de choix, de tri ou de classement. Une autre problématique notée δ correspond plus à un objectif de description des actions et de leurs conséquences.

La décision porte toujours sur des actions ou des alternatives. La terminologie peut induire une confusion. Ces alternatives peuvent, en effet, être de réelles actions (mettre en place un plan d'évacuation, construire un barrage). Concrètement, ces problématiques de décision peuvent, par exemple, prendre les formes suivantes :

- Dans le contexte du zonage d'un aléa, la décision globale concerne évidemment la proposition d'un tracé délimitant les zones de risque faible où l'on pourra construire, les zones où les constructions seront réglementées et les zones où il sera interdit de construire. Dans le cadre d'une approche multicritères, les alternatives seront, par exemple, des zones (pixels) qu'il faudra classer ou ranger par rapport à un niveau de risque³. Le classement des points permettra ensuite de définir une zone globale. On peut aussi imaginer que les alternatives correspondent à différents tracés de zones comparés entre eux ;
- Dans le contexte de la définition de stratégies de protection, la décision peut porter sur le choix entre des types de mesures à mettre en œuvre⁴. Il peut s'agir par exemple de construire un barrage de sédimentation ou de mettre en place des ouvrages de protection active. Les alternatives sont alors ces deux types de construction qui vont être comparées en fonction de leur coût, de leur efficacité à court terme, de leur impact environnemental ... ;
- Dans une situation de risque, différentes solutions ou alternatives peuvent être envisagées évacuer toute la commune, évacuer par secteurs, ne rien faire, protéger ;
- Dans le cadre de l'analyse d'un phénomène torrentiel lors d'une expertise technique, il peut s'agir de définir les principales zones d'apport en matériaux en vue de définir des scénarios ou de localiser des protections. Les alternatives sont alors des zones géographiques. On peut aussi imaginer avoir à comparer la confiance entre des scénarios de phénomène en fonction des éléments d'information dont on dispose ;
- Dans le cadre de l'analyse de l'efficacité d'un dispositif, il peut s'agir d'évaluer l'état des ouvrages et de définir les priorités d'intervention. Les alternatives sont des ouvrages analysés en fonction de critères relatifs à leur état, position dans le dispositif ...

3. voir une application de ce type en 9.2, p. 252

4. voir, par exemple, l'annexe B.3, p. 335

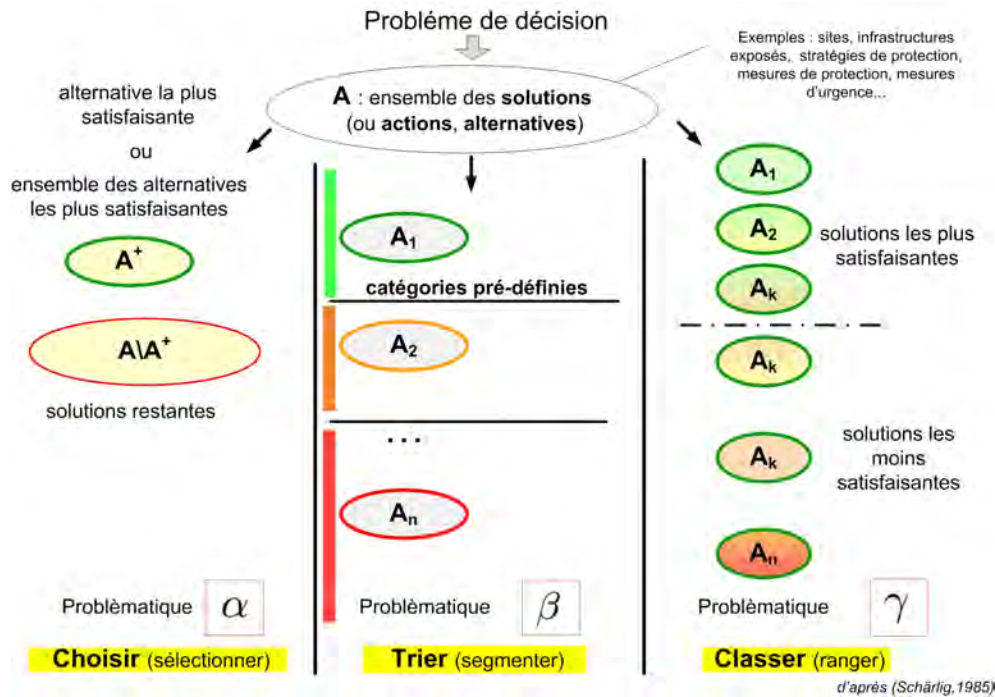


FIGURE 4.2 – Trois problématiques d'aide multicritères à la décision : choisir, ranger, trier

La formulation multicritères d'un problème de décision peut donc être définie comme le modèle $\{A, A/F, E\}$ (Vansnick, 1990) avec :

- A , l'ensemble des actions (ou alternatives, solutions) potentielles (ou envisageables, admissibles) pouvant être défini par extension (ensemble fini) avec des contraintes implicites ou par compréhension sur la base de contraintes explicites (cas d'un ensemble infini ou fini de trop grande taille). Par exemple, A peut être un ensemble des sites d'avalanches désignés nommément, de façon exhaustive et dénombrable (cas d'une définition par extension). A peut être défini aussi comme "les sites d'avalanches du département des Hautes-Alpes" (définition par compréhension sur la base d'une propriété, les sites sont dans un département donné mais on ne les définit pas tous) ;
- A/F , l'ensemble fini des critères (ou des attributs) $c_1, c_2, \dots, c_j, \dots, c_n$ généralement conflictuels à partir desquels les actions sont évaluées. Un critère peut être la surface de la zone de départ d'une avalanche, le nombre d'habitants exposés ... ;
- E , l'ensemble des évaluations des performances des actions selon chacun des critères, représentées pour chaque action par un vecteur de performances. Par exemple, pour un site donné, le vecteur de performances correspond à une surface de 10 *ha*, un nombre d'habitants de 15, ...

Sur ces bases, le processus d'aide à la décision peut être décomposé en quatre niveaux (Bouys-sou et Roy, 1993) :

1. Définition de l'objet de la décision (objectifs, acteurs, modélisation, nature des actions ...) ;
2. Elaboration et choix des critères
 - par une approche hiérarchique (du haut vers le bas) d'un objectif global vers les sous-objectifs ; (Martel, 1999; Keeney and Raiffa, 1976; Saaty, 1982)
 - par une approche du bas vers le haut en analysant les conséquences des actions (Roy, 1985) ;
3. Modélisation des préférences, évaluation des performances et agrégation ;

4. Analyse des résultats et élaboration d'une recommandation.

Les évaluations des performances ou des impacts des actions selon chacun des critères proviennent de formules, de mesures, de jugements et sont soumis à des incertitudes et imperfections plus ou moins importantes (Bouyssou, 1989).

L'aide à la décision associe les acteurs du processus de décision qui doivent participer activement à l'élaboration du modèle, considéré comme un support à la réflexion, la négociation et à la créativité (Martel, 1999; Roy, 1985). La démarche de création du modèle peut être soit descriptive, soit constructive (Bouyssou, 2003). L'approche descriptive suppose qu'il existe dans l'esprit des décideurs un système de préférences entre les critères que l'on peut expliciter, le modèle constituant alors une aide pour les déterminer sans ambiguïté. L'approche constructive suppose que les préférences des intervenants ne sont pas structurées et sont influencées par la construction du modèle qui évolue de manière interactive en tolérant des hésitations et des incomparabilités entre critères.

Relations, structures et agrégation de préférences

Un décideur ayant à comparer deux solutions a_1 et a_2 d'un ensemble A de décisions pourra avoir l'une des trois réactions suivantes (Vincke, 1989) :

- Préférence notée P de a_1 sur a_2 soit $a_1 P a_2$
- Indifférence notée I entre a_1 et a_2 soit $a_1 I a_2$
- Refus, Impossibilité de comparer ou Incomparabilité entre a_1 et a_2 soit $a_1 R a_2$

Les trois relations $\{P, I, R\}$ définissent une structure de préférences. Elles ont les propriétés suivantes :

- $a_1 P a_2 \Rightarrow a_2 \bar{P} a_1$: la préférence P est antisymétrique
- $a_1 I a_1$: l'indifférence I est réflexive
- $a_1 I a_2 \Rightarrow a_2 I a_1$: l'indifférence I est symétrique
- $a_1 \bar{R} a_1$: l'incomparabilité I est irreflexive
- $a_1 R a_2 \Rightarrow a_2 R a_1$: l'incomparabilité R est symétrique

Toute structure de préférence peut être définie par une relation S dite de préférence au sens large définie par :

$$a_1 S a_2 \Leftrightarrow a_1 P a_2 \text{ ou } a_1 I a_2$$

On a en effet :

- $a_1 P a_2 \Leftrightarrow a_1 S a_2 \text{ et } a_2 \bar{S} a_1$
- $a_1 I a_2 \Leftrightarrow a_1 S a_2 \text{ et } a_2 S a_1$
- $a_1 R a_2 \Leftrightarrow a_1 \bar{S} a_2 \text{ et } a_2 \bar{S} a_1$

La structure de préférences traditionnelle correspond à l'approche assimilant un problème de décision à l'optimisation d'une fonction g définie sur l'ensemble A des actions ou alternatives. Cette approche suppose que les préférences du décideur suivent le modèle suivant :

$$\forall a_i, a_j \in A \begin{cases} a_i P a_j \Leftrightarrow g(a_i) > g(a_j) \\ a_i R a_j \Leftrightarrow g(a_i) = g(a_j) \end{cases} \quad (4.1)$$

Cette structure présente les propriétés suivantes $\forall a_i, a_j, a_k \in A$:

- $a_i \bar{R} a_j$: il n'y a pas d'incomparabilité ;
- $a_i P a_j \text{ et } a_j P a_k \Leftrightarrow a_i P a_k$: P est transitive ;
- $a_i I a_j \text{ et } a_j I a_k \Leftrightarrow a_i I a_k$: I est transitive ;.

La relation caractéristique S associée au modèle traditionnel est telle que :

$$\forall a_i, a_j, a_k \in A \begin{cases} a_i S a_j \text{ ou } a_j S a_i : S \text{ est une relation complète} \\ a_i S a_j \text{ et } a_j S a_k \Leftrightarrow a_i S a_k : S \text{ est transitive} \end{cases} \quad (4.2)$$

Cette relation s'appelle un pré-ordre total (ou complet) et correspond à la situation où l'on peut ranger les éléments de A du meilleur au moins bon avec la possibilité d'ex aequo car $a_i S a_j \Leftrightarrow g(a_i) \geq g(a_j)$. S'il n'y a pas d'ex-aequo, l'ordre est total. Une structure de préférences est une structure de pré-ordre total si elle peut être représentée par le "modèle traditionnel". C'est une structure d'ordre total si la relation d'indifférence I se limite aux couples identiques. Les critères utilisés dans une structure de pré-ordre total sont dits *vrais critères*.

La non-transitivité de l'indifférence est une remarque fondamentale dans la modélisation des préférences qui a motivé le développement de nouvelles structures de préférences. L'exemple (Luce, 1956) suivant illustre le principe : on considère une tasse de café sucrée T_i contenant i milligrammes de sucres. Un individu compare cette tasse de café sucrée avec une tasse T_{i+1} à laquelle on a enlevé quelques milligrammes de sucre par rapport à T_i . Il ne voit pas de différence entre les deux tasses : il est indifférent. Dans le même temps, il fait la différence entre une tasse bien sucrée et sans sucre : il préférera la tasse sucrée. L'indifférence n'est donc pas transitive. Pour la prendre en compte, on peut donc introduire par exemple un seuil d'indifférence q dans le modèle de préférences (EQ. 4.3) et des variantes sur les seuils de préférences⁵ :

$$\forall a_i, a_j \in A \begin{cases} a_i P a_j \Leftrightarrow g(a_i) > g(a_j) + q \\ a_i I a_j \Leftrightarrow |g(a_i) - g(a_j)| \leq q \end{cases} \quad (4.3)$$

Ces approches sont mises en œuvre dans le cadre des méthodes de sur-classement qui exploitent un modèle de préférences défini sous la forme d'une relation binaire S dite de sur-classement qui peut être ni complète, ni transitive. Pour deux actions a et b appartenant à A , la proposition (a surclasse b) est établie s'il existe des arguments suffisamment probants, selon les préférences du décideur, pour accepter l'assertion : " a est au moins aussi bon que b " (Roy, 1985). Cette assertion est acceptée en fonction de profils de performance des actions (constitués par la valuation des actions pour chacun des critères) et sur les préférences du décideur pour chaque critère pouvant être définis au travers de valeurs de poids, de seuils définissant des zones d'indifférence, de préférence faible et de veto (FIG. 4.3). Cette méthode admet donc des nuances, des imprécisions dans l'expression des préférences contrairement aux méthodes d'agrégation totale. De nombreuses méthodes telles que celles appartenant à la famille des méthodes *ELECTRE* sont conçues sur ce principe (Schärlig, 1985; Vincke, 1989). Leurs mécanismes d'agrégation tolèrent des compensations quand les écarts entre critères sont faibles et les rejettent autrement. Ils évitent les critiques faites aux méthodes d'agrégation totales additives fortement compensatoires (Vanderpooten et Vallin, 2002). Par contre, les algorithmes utilisés sont, d'un point de vue pratique, parfois jugés compliqués et difficilement compréhensibles par les décideurs (Linkov et al., 2006).

Deux principes sont utilisés pour évaluer la réalité du sur-classement de a par b . Le principe de concordance est basé sur un indice de concordance noté $C(a, b)$: une majorité de critères, considérés selon leur importance (poids) doit supporter l'assertion aSb . Le principe de non-discordance est basé sur un indice de discordance noté $D(a, b)$: pour les deux actions comparées, parmi les critères qui ne supportent pas l'assertion, aucun ne doit exprimer un désaccord trop fort.

D'un point de vue pratique, certaines de ces méthodes nécessitent de comparer l'ensemble des actions entre elles, ce qui peut devenir réducteur dans le cas d'un grand nombre d'actions (par exemple des sites à risques dans le cadre d'un inventaire national) : il faut donc s'intéresser à celles permettant de réaliser des tris. La méthode *ELECTRE TRI* a par exemple été utilisée pour classer des sites soumis à un risque minier (Merad et al., 2004). Des catégories sont définies

5. voir les synthèses proposées par (Vincke, 1989; Schärlig, 1985, 1996; Bouyssou et Roy, 1993)

par des valeurs seuils pour tous les critères. Chaque site est ensuite comparé à ces valeurs seuils pour définir s'il appartient ou pas à cette catégorie.

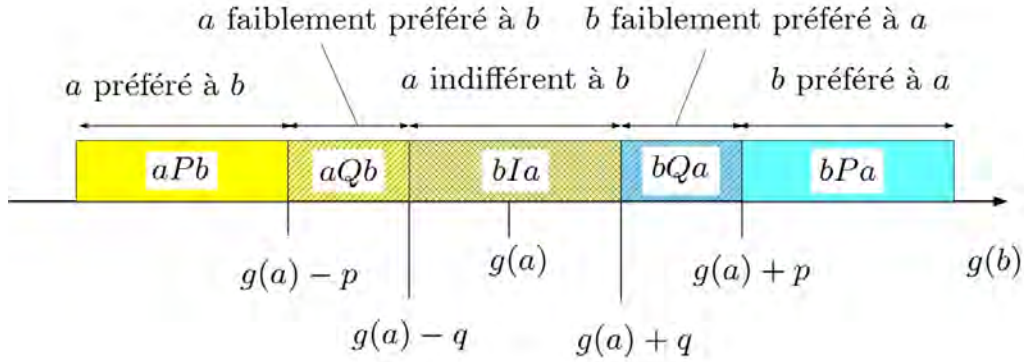


FIGURE 4.3 – Seuils d'indifférence et de préférence définissant un pseudo-critère d'après (Vanderpooten et Vallin, 2002)

L'agrégation de préférences peut être définie comme "une opération permettant d'obtenir des informations sur la préférence globale entre les actions potentielles, à partir d'information sur les préférences par critères" (Maystre et al., 1994). Soit un ensemble A d'actions (ou solutions, alternatives) évalué sur m critères c_1, c_2, \dots, c_m . Elle peut être définie de la manière suivante : soit $n \geq 2$ relations binaires de préférence définies sur A évaluant les actions et notées \succsim_i avec $i \in \{1, 2, \dots, n\}$. L'agrégation des n relations de préférences est un mécanisme permettant de transformer tout n -uple de relations $(\succsim_1, \succsim_2, \dots, \succsim_n)$ sur A en une relation de préférence collective \succsim . A partir de préférences définies pour chaque critère (on peut comparer les actions selon chaque critère), on obtient une préférence qui "combine" toutes ces préférences (pour comparer les actions globalement entre elles).

Les plus simples des méthodes d'agrégation totale des préférences sont la somme pondérée et la multiplication de ratios (voir E.1, p. 347). La somme pondérée suppose que l'on peut exprimer les critères dans les mêmes unités et que les écarts de valeurs sur des critères différents sont comparables et peuvent se compenser. Les poids, aux variations desquelles le résultat est extrêmement sensible, intègrent à la fois la notion d'importance relative des critères et un facteur de normalisation des échelles de critère (Vanderpooten et Vallin, 2002). Dans une somme pondérée, ce sont des taux de substitution qui visent à assurer un taux de conversion correct entre les critères (Roy, 1985). Ils doivent être interprétés comme exprimant sur une même échelle, les écarts de préférence relatifs à des critères différents ou comme un "gain sur un critère permettant de compenser une perte sur une autre" (Vincke, 1989).

A côté de ces méthodes élémentaires, d'autres méthodes sont basées sur des combinaisons plus ou moins recherchées des utilités (formes additive, multiplicative, mixte...). Les méthodes d'agrégation partielle exploitent quant à elles les résultats dans le cadre des méthodes de sur-classement. La plupart des méthodes ont été initialement conçues pour ne prendre en compte qu'un seul décideur mais des méthodologies ont été proposées pour les étendre au cas de décision de groupes (Jabeur et Martel, 2005).

4.2.2 Classes de méthodes d'aide multicritères à la décision

La description exhaustive de toutes les méthodes d'analyse multicritères est impossible mais il en existe des synthèses comparatives (Guitouni and Martel, 1998; Linkov et al., 2006). Un état de l'art complet peut être trouvé dans (Figueira et al., 2005). Les méthodes peuvent être classées par familles (Vincke, 1989; Roy, 1985; Schärli, 1985) en distinguant soit :

1. les méthodes basées sur la théorie de l'utilité multi-attribut (*MAUT*) et ses dérivés (*AHP*). Ces méthodes utilisent un principe d'agrégation complète transitive. Ces approches reposent sur un critère unique de synthèse évacuant toute incomparabilité (école dite "américaine") ;
2. les méthodes dites de sur-classement de synthèse qui construisent des relations de sur-classement. Ces méthodes acceptent l'incomparabilité (école "francophone") et sont basées sur des méthodes d'agrégation partielle.
3. les méthodes inter-actives, du jugement local basées sur des agrégations locales.

Seules les deux premières familles nous intéressent ici⁶. Les méthodes de la première famille correspondent aux méthodes dérivées de la théorie de l'utilité multi-attribut (*MAUT*). Basées sur une démarche descriptive, elles agrègent les différents points de vue en une fonction unique qu'il s'agit ensuite d'optimiser. Les différences portent sur les conditions mathématiques d'agrégation, les formes et les méthodes de construction des fonctions d'agrégation. Les principales méthodes appartenant à cette approche sont les méthodes *MAUT*, *AHP*, *SMART*, *UTA*, *TOPSIS*⁷.

Les méthodes de la seconde famille ("école francophone") correspondent à une approche constructive. Elles établissent d'abord des relations binaires (généralement ni complète, ni transitive) de sur-classement qui représentent les préférences du décideur sur la base de l'information dont il dispose. Des seuils de préférence (indifférence, préférence faible) et de veto sont utilisés pour modéliser les préférences du décideur. La seconde phase vise à exploiter les résultats des sur-classements pour aider le décideur à résoudre son problème. Les principales méthodes appartenant à cette approche sont les méthodes : *ELECTRE*, *PROMETHEE*, *ORESTE*, *QUALIFLEX*.

Le choix d'une méthode est en soit un véritable problème de décision. Des recommandations peuvent être proposées pour choisir entre ces méthodes en fonction notamment du nombre de décideurs, de la compréhension du principe de la méthode par le décideur (par exemple comparaison par paires), de la problématique de décision (choix, tri, rangement), du niveau de compensation accepté par le décideur (Guitouni and Martel, 1998).

4.2.3 La théorie de l'utilité multi-attribut

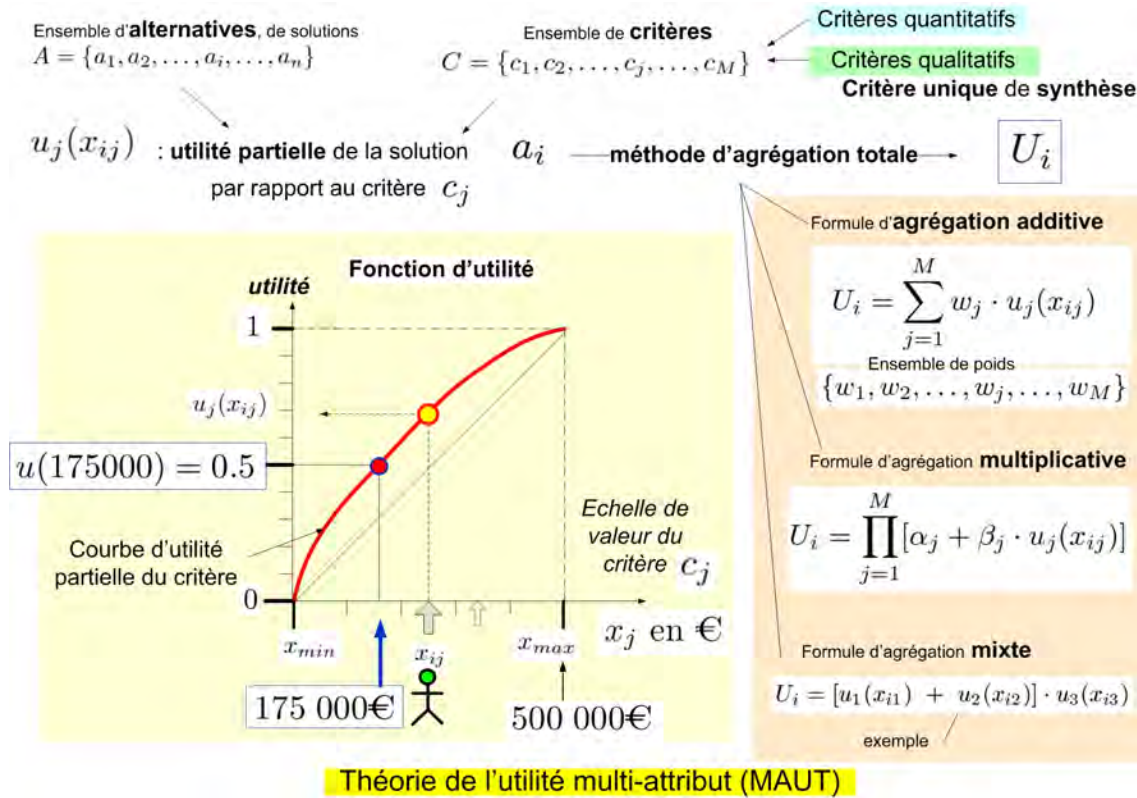
La théorie *MAUT* (Théorie de l'utilité multi-attribut⁸) (Keeney and Raiffa, 1976) est dérivée de la théorie de l'utilité espérée elle-même dérivée de la théorie de la décision dans l'incertain. Elle repose sur un principe d'agrégation complète (ou totale) transitive et l'axiome suivant : tout décideur devant évaluer un ensemble A d'actions selon i dimensions (critères), essaie inconsciemment ou implicitement de maximiser une fonction $U = U(c_1, c_2, \dots, c_n)$ ou c_i représente la relation (fonction) de préférence du décideur pour la i^{me} dimension (Vincke, 1989).

Le principe de la méthode est de mesurer l'utilité totale d'une action a_i pour le décideur à partir des utilités partielles ou élémentaires u_{ij} correspondant à chacun des critères c_j de la décision. Les jugements exprimés pour chacun des critères sont ensuite rassemblés dans une seule fonction d'utilité résultante U_i par une méthode d'agrégation pouvant prendre des formes additives, multiplicatives ou mixtes. Une fonction d'utilité partielle u_j signifie que le décideur peut mesurer objectivement l'action a_i selon le critère c_j par la mesure x_{ij} et que l'utilité du résultat dans le cadre de la décision à prendre s'exprime subjectivement par une fonction d'utilité u_j qui prend une valeur $u_j(x_{ij})$.

6. voir (Schärlig, 1985; Vincke, 1989) pour la description des méthodes non développées

7. voir une comparaison complète dans (Zanakis et al., 1998)

8. Multiple Attribute Utility Theory


 FIGURE 4.4 – Principe de la théorie *MAUT* (Multi-attribute utility theory)

Les fonctions d'utilité constituent le cœur de la théorie *MAUT*. Leur élaboration repose sur un principe de loterie associée à chacun des critères. Pour chacun des niveaux d'utilité allant de 0 à 1, le principe est d'évaluer l'"équivalent certain" du décideur en situation de choix entre les valeurs de la grandeur évaluant le critère.

Par exemple, on considère⁹ un critère c_j correspondant au montant des dommages évités par une stratégie de protection (évalué en € et noté x_j) (FIG. 4.4). On pose la question suivante : "vous avez le choix entre un premier dispositif qui permettrait d'avoir 50% de chances d'éviter 100000€ de dommages et 50% de chances d'éviter 500000€ de dommages et un second dispositif qui permettrait d'éviter de façon certaine pour 300000€ de dommages. Choisissez-vous ce second dispositif?". Le décideur répond oui. La question est reposée avec une valeur de 100000€ et il répond non. Finalement la valeur qui le fait hésiter est de 175000€. Cette valeur correspond à son équivalent certain pour l'utilité $u(x_j) = 0.5$. On construit ainsi une courbe d'utilité par itération. Ensuite, pour évaluer une stratégie de protection notée a_i , on détermine, par une méthode ad-hoc, le montant des dommages évités x_{ij} par la solution a_i . La courbe permet alors de définir la valeur d'utilité $u(x_{ij})$ de la stratégie a_i pour le critère c_j . Les méthodes d'agrégation permettent ensuite de combiner (d'agréger) les utilités d'une même alternatives pour tous les critères. La valeur résultante permet de comparer les alternatives. Ceci n'est qu'un exemple et il existe de très nombreuses méthodes pour déterminer la courbe d'utilité (Vincke, 1989).

Ce principe de loterie est facilement compréhensible si l'on raisonne en terme de pertes et de gains économiques (Schärlig, 1985). Il suppose donc soit d'être capable de transcrire les grandeurs descriptives du critère sous une forme économique, soit de raisonner en terme de loteries sur des grandeurs non monétaires. La détermination des fonctions d'utilité partielles reste une phase

9. d'après (Schärlig, 1985)

délicate et subjective ayant donné lieu à de nombreuses méthodes qui ont fait évoluer le principe initial basé sur des loteries (Vincke, 1989).

L'indépendance préférentielle est obligatoire. Ce modèle additif impose que les structures de préférences sur chaque critère et sur la préférence globale soient des pré-ordres totaux : transitivité de la préférence et de l'indifférence. Dans le cas de vrais critères, l'indépendance au sens des préférences de paires de critères est indispensable pour utiliser un modèle additif. Cela ne signifie cependant pas que le mode additif est le seul moyen de représenter fonctionnellement le système de représentation des préférences (indifférence, préférence) pré-existant (Roy, 1985), ni qu'il permet de représenter la structure de préférences du décideur¹⁰. L'indépendance préférentielle se définit de la manière suivante (Vincke, 1989) : soit un problème de décision multicritères avec $A = \{a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_n\}$ l'ensemble des n actions (solutions, alternatives) évaluées, $C = \{c_1, c_2, \dots, c_j, \dots, c_M\}$ l'ensemble de M critères et P la relation globale de préférences entre critères. On note $c_j(a_i)$, l'évaluation de l'action a_i selon le critère c_j . On considère un sous-ensemble de la famille de critères Ω et $\bar{\Omega}$, son complémentaire. Ω est préférentiellement indépendant dans C si, étant donné 4 actions a_1, a_2, a_3, a_4 telles que :

$$\begin{cases} c_j(a_1) = c_j(a_2), \forall j \in \bar{\Omega} \\ c_j(a_3) = c_j(a_4), \forall j \in \bar{\Omega} \\ c_j(a_1) = c_j(a_3), \forall j \in \Omega \\ c_j(a_2) = c_j(a_4), \forall j \in \Omega \end{cases} \quad (4.4)$$

on a $a_1 P a_2 \Rightarrow a_3 P a_4$

L'agrégation des fonctions d'utilité peut être envisagée selon des méthodes d'agrégation additive, multiplicative ou mixte. Soit $A = \{a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_n\}$ l'ensemble des n actions (solutions, alternatives) évaluées et $C = \{c_1, c_2, \dots, c_j, \dots, c_M\}$ un ensemble de M critères. Chaque critère est évalué par une fonction d'utilité partielle u_j (strictement croissante et à valeurs réelles) et pondéré par un poids w_j . L'évaluation de l'alternative a_i par rapport au critère j est notée x_{ij} . Son utilité partielle est notée $u_j(x_{ij})$. La méthode d'agrégation la plus utilisée est la forme additive. Les fonctions d'utilité servent ici à transformer les critères initiaux pour les exprimer dans la même échelle pour éviter les problèmes d'unité et donner un sens à la somme. L'utilité totale calculée pour l'alternative a_i par agrégation additive (FIG. 4.4) est définie par :

$$U_i = \sum_{j=1}^M w_j \cdot u_j(x_{ij}) \quad (4.5)$$

L'utilité totale calculée pour l'alternative a_i par agrégation multiplicative (FIG. 4.4) est définie par :

$$U_i = \prod_{j=1}^M [\alpha_j + \beta_j \cdot u_j(x_{ij})] \quad (4.6)$$

Quand il est impossible de satisfaire l'indépendance préférentielle, d'autres modèles de combinaison des utilités dits "mixtes" (Krantz et al., 1971) sont proposés (FIG. 4.4) en combinant par exemple dans le cas de trois critères, c_1, c_2 et c_3 avec les critères c_1 et c_2 indépendants préférentiellement. L'évaluation de l'alternative a_i par rapport au critère j est notée x_{ij} . Son utilité partielle est notée $u_j(x_{ij})$:

$$U_i = [u_1(x_{i1}) + u_2(x_{i2})] \cdot u_3(x_{i3}) \quad (4.7)$$

10. voir contre-exemple en 7.1.1, p. 140

L'extension en univers risqué ou incertain de cette formule est envisagée en introduisant les probabilités résultant des états de la nature et attachées aux diverses conséquences d'une action (FIG. 4.1). Dans ce contexte, d'autres modèles tels que le modèle à dépendances de rang ont été proposés pour répondre aux critiques relatives au modèle d'utilité espérée et tenir compte de l'aspect subjectif des probabilités (Abdellaoui and Gonzales, 2006; Bouyssou and Vincke, 2002)(voir annexe E.2.2, p. 348). Cette approche a été introduite de manière opérationnelle dans le contexte des risques industriels. L'extension de l'approche décisionnelle au domaine des risques difficilement probabilisables reste cependant encore un sujet de recherche pour mieux caractériser les incertitudes notamment dans une perspective bayésienne (Magne et Vasseur, 2006).

Une axiomatique solide mais critiquée caractérise la théorie de l'utilité multi-attribut (Schärlig, 1985). Tout d'abord, la méthode suppose que les décideurs possèdent à la fois une vision claire et pré-existante du problème de décision. Ils doivent être capables de projeter chaque critère sur la structure de préférence globale en exprimant des fonctions d'utilités partielles représentant des taux de substitution pour tous les critères. Les taux peuvent varier d'un critère à un autre et entre critères en étant fortement influencés par des visions non rationnelles du problème. Enfin contrairement aux méthodes basées sur le sur-classement, les méthodes d'agrégation totale sont fortement compensatoires.

4.2.4 La méthode multicritères hiérarchique (*AHP*)

Appartenant à la famille des méthodes du critère unique de synthèse (ou d'agrégation totale)(Dyer, 2005), la méthode hiérarchique multicritères (Analytic Hierarchy Process -*AHP*) (Saaty, 1982, 2005) présente trois originalités :

- elle utilise une décomposition et une représentation hiérarchique pour formuler un problème sous une forme multicritères ;
- elle explicite les préférences entres critères selon un principe basé sur une échelle de ratio sémantique ;
- les actions occupent le dernier niveau de la hiérarchie mais leur évaluation est faite sur le même principe que les autres niveaux de la hiérarchie.

Le modèle est décomposé de façon hiérarchique

Justification de la démarche analytique L'esprit humain utilise des représentations géométriques pour représenter la pensée : les objets et les idées identifiés sont autant de sommets, de limites connectées par des chemins et des cycles. Ces éléments sont groupés selon leur propriétés communes par rapport à nos objectifs (Saaty and Shih, 2009).

La méthode *AHP* repose sur une approche analytique visant à décomposer le problème de décision pour le rendre accessible au raisonnement humain. Chaque entité matérielle ou abstraite est décomposée en éléments constitutifs. L'analyse s'oppose à la notion de synthèse qui tend à regrouper plusieurs sous-parties en un seul tout. L'*AHP* est donc à la fois analytique en terme de construction du modèle et synthétique en terme d'agrégation (FIG. 4.5).

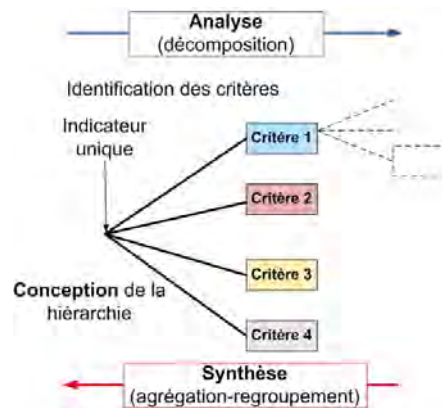


FIGURE 4.5 – Analyse et synthèse au travers de l'AHP

Cette approche se justifie notamment d'un point de vue cognitif par des travaux réalisés dans le domaine de la psychologie qui montre que l'esprit humain ne peut gérer simultanément plus de 7 concepts en même temps (Miller, 1994). Des analogies peuvent être faites avec d'autres représentations de l'information sous une forme arborescente. Par exemple, un modèle de décision analytique hiérarchique s'apparente à un arbre de causes (voir FIG. 3.6, p. 76) et peut être utilisé pour expliciter le jugement expert (Forman and Selly, 2002).

Méthodologie de construction d'un nouveau modèle Les phases de construction d'un modèle de décision hiérarchique sont les suivantes (Saaty, 1982; Forman and Selly, 2002) :

- Identification de la problématique puis expression du besoin par le décideur : quelle est la nature de la décision ?
- Constitution du groupe d'experts et phases de discussion, proposition avec une nécessaire créativité ;
- Identification des critères candidats, grandeurs utilisées pour l'évaluation ;
- Structuration hiérarchique descendante à partir d'objectifs globaux décomposés et/ou ascendante à partir d'alternatives réelles que l'on essaie de comparer (constitution d'un jeu d'alternatives test permettant notamment d'identifier des valeurs limites) ;
- Construction du modèle ;
- A chaque niveau de la hiérarchie, analyse de l'importance relative des critères les uns par rapport aux autres (définir les priorités), vérification de la cohérence des jugements ;
- Evaluation des alternatives tests, analyse de sensibilité.

Saaty and Shih (2009) proposent d'analyser les résultats de manière statistique pour étudier sa sensibilité et suggère de vérifier la logique et la complétude de la structure. La logique de la structure doit permettre de vérifier les relations d'influence des facteurs les uns sur les autres dans les sens ascendants et descendants de la hiérarchie. Des questions de base relatives au contenu de la structure permettent aussi de vérifier la structure : qui ? pourquoi ? quoi ? quand ? où ? et comment ?

Le modèle hiérarchique doit être construit selon certaines règles :

- nombre maximal de niveaux conseillé ;
- indépendance des critères ;

L'AHP utilise des échelles de mesure relatives

Une méthode d'aide à la décision doit justifier la façon dont elle explicite les jugements, les convertit en nombre et produit une réponse globale appartenant à ces échelles. L'analyse multicritères hiérarchique (Analytic Hierarchy Process - AHP) n'utilise pas d'échelles de mesures

homogènes et linéaires. Elle exploite la possibilité qu'a chacun de comparer des éléments de décision de manière relative pour en extraire des priorités.

La prise de décision implique des compromis qui se traduisent par des opérations arithmétiques sur des poids représentant les jugements. Les types d'opérations possibles sur ces poids dépendent de la nature et de l'homogénéité des échelles utilisés. Les échelles les plus courantes sont les échelles ordinales qui ne peuvent être ajoutées ou multipliées, les échelles d'intervalles, les échelles de ratio et les échelles absolues qui nécessitent de définir une unité avant de construire l'échelle. Sur une échelle ordinale numérique, les nombres utilisés n'ont qu'une valeur relative pour effectuer le classement sur une échelle : les distances entre les valeurs ne peuvent pas être interprétées (Marichal, 2006).

La méthode *AHP* ne nécessite pas le recours à une échelle absolue. L'échelle n'est pas une hypothèse de départ mais le résultat de mesures provenant de comparaisons par paires. Les mesures mêmes réalisées sur les bases d'échelles absolues sont considérées comme des indicateurs ou des stimuli pour l'esprit établissant un lien entre un nombre et la grandeur, l'importance d'un phénomène. La mesure n'a une valeur intrinsèque que pour celui qui l'utilise. L'appréciation par un individu apparaît ici subjective. Le passage d'une évaluation individuelle à celle produite par un groupe nécessite un accord sur le mode de transformation des évaluations individuelles en une valeur objective et partagée.

Deux types d'échelles relatives sont utilisées dans le cadre de décisions multicritères. D'un côté, il peut s'agir d'une normalisation de nombres absolus, obtenue en divisant chaque nombre lu sur une échelle par la somme des valeurs absolues de ces nombres. De l'autre côté, on peut considérer les nombres absolus comme des éléments de dominance ou de préférence entre critères. L'échelle n'est donc ici qu'une unité de comparaison. Saaty (1994) montre simplement que la méthode *AHP* permet de reproduire les résultats obtenus avec une échelle de mesure absolue quand les poids des critères sont décrits avec des nombres absolus.

Principe de la méthode *AHP*

Expression des préférences L'*AHP* peut être considérée comme un cas particulier ou une simplification de modèles de préférence multi-attributs (Dyer, 2005). Dans la méthode *AHP*, les mesures exprimées par les décideurs sont transformées dans une échelle de priorité uniforme basée sur une appréciation de leur importance contextuelle (traduisant un niveau de préférence). Une mesure brute n'a pas de valeur intrinsèque. Par exemple, à surface égale, un dépôt torrentiel peut être confiné dans le lit mineur ou bien correspondre à un débordement et à des dégâts importants. Au-delà de la valeur brute, le contexte et l'objectif de l'évaluation sont essentiels. Pour établir des comparaisons par paires, la méthode *AHP* utilise une échelle de valeurs absolues comprises entre 1 et 9. Partant du principe que le langage permet de mieux exprimer les sentiments, l'échelle de valeurs absolue est associée à une échelle sémantique décrivant l'importance d'un critère sur un autre (FIG. 4.6) :

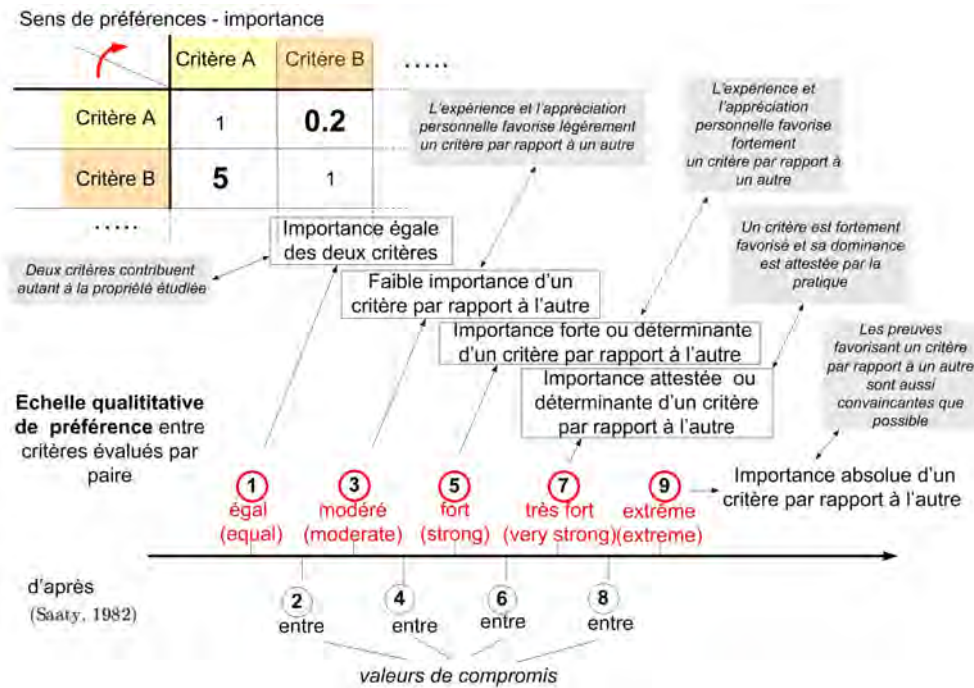


FIGURE 4.6 – Echelle verbale des préférences de l'AHP

Les critères sont classés hiérarchiquement de la racine vers les critères terminaux. La racine de l'arbre (*niveau*1) correspond au niveau de la décision à prendre. La profondeur de l'arbre est définie comme le nombre maximal de niveaux. Pour chacun des critères secondaires (hors critères terminaux), une matrice de préférences synthétise les préférences (ou importances) exprimées par les décideurs entre les sous-critères issus du critère considéré. Soit un arbre de profondeur $nbNiveaux$ (equation 4.8 , page 101). On s'intéresse à un critère situé à un niveau k de l'arbre et à ses n différents sous-critères. Dans la méthode AHP initiale, chacun des n critères est comparé aux autres critères selon l'échelle de préférences (FIG. 4.6). La comparaison entre le critère $n^{\circ}i$ lu sur la première colonne et le critère $n^{\circ}j$ lu sur la première ligne (préférence de i sur j) est évaluée par p_{ij} , valeur choisie sur l'échelle de Saaty (FIG. 4.6). Son symétrique par rapport à la diagonale vaut $1/p_{ij}$. Pour un ensemble de n critères, le nombre de comparaisons à effectuer correspond aux éléments d'une matrice carrée $n * n$ situés soit en dessus ou en dessous de la diagonale soit $\frac{n(n-1)}{2}$ comparaisons (FIG 4.7).

sens de préférences

	critère n°1	critère n°2	critère n°3	critère n°4
critère n°1	1	$1/p_{21}$	$1/p_{31}$	$1/p_{41}$
critère n°2	p_{21}	1	$1/p_{32}$	$1/p_{42}$
critère n°3	p_{31}	p_{32}	1	$1/p_{43}$
critère n°4	p_{41}	p_{42}	p_{43}	1

FIGURE 4.7 – Matrice de préférences AHP

4.2. L'AIDE MULTICRITÈRES À LA DÉCISION

Calcul des pondérations Soit une matrice de préférences A (Exemple en Eq. 4.8 dans le cas de 4 critères avec une matrice de dimension $n = 4$).

$$A = \begin{pmatrix} 1 & \frac{1}{p_{21}} & \frac{1}{p_{31}} & \frac{1}{p_{41}} \\ p_{21} & 1 & \frac{1}{p_{32}} & \frac{1}{p_{42}} \\ p_{31} & p_{32} & 1 & \frac{1}{p_{43}} \\ p_{41} & p_{42} & p_{43} & 1 \end{pmatrix} \quad (4.8)$$

De manière générale, le vecteur de pondération W est un vecteur propre de la matrice de préférences A de dimension (n, n) de valeur propre λ , dont la valeur propre dominante définit l'indice de cohérence moyenne de la matrice A soit $A \cdot W = \lambda \cdot W$

Pour l'obtenir, la matrice de préférences A est d'abord normalisée. Chaque élément p_{ij} de la matrice est divisé par la somme de préférences de la colonne à laquelle il appartient soit $pNorm_{ij} = p_{ij}/Sc_j$ avec $Sc_j = \sum_{k=1}^n p_{kj}$. On obtient une matrice de préférences normalisée $ANorm$ (equation 4.9) .

$$ANorm = \begin{pmatrix} \frac{1}{Sc_1} & \frac{1}{p_{21} \cdot Sc_2} & \frac{1}{p_{31} \cdot Sc_3} & \frac{1}{p_{41} \cdot Sc_4} \\ \frac{p_{21}}{Sc_1} & \frac{1}{Sc_2} & \frac{1}{p_{32} \cdot Sc_3} & \frac{1}{p_{42} \cdot Sc_4} \\ \frac{p_{31}}{Sc_1} & \frac{p_{32}}{Sc_2} & \frac{1}{Sc_3} & \frac{1}{p_{43} \cdot Sc_4} \\ \frac{p_{41}}{Sc_1} & \frac{p_{42}}{Sc_2} & \frac{p_{43}}{Sc_3} & \frac{1}{Sc_4} \end{pmatrix} \quad (4.9)$$

Le vecteur de pondération W est un vecteur colonne de dimension n (nombre de critères). Chaque terme w_i du vecteur correspond à la pondération du critère n° i relativement aux préférences exprimées dans la matrice de préférences A . Les termes w_i sont définis à partir de chaque ligne de la matrice de préférences normalisée $ANorm$. Les termes w_i sont définis par $w_i = \frac{Sl_j}{n}$ avec $Sl_j = \frac{1}{Sc_j} + \sum_{k=1, k \neq j}^n \frac{p_{jk}}{Sc_j}$ et n nombre de critères (FIG 4.8) .

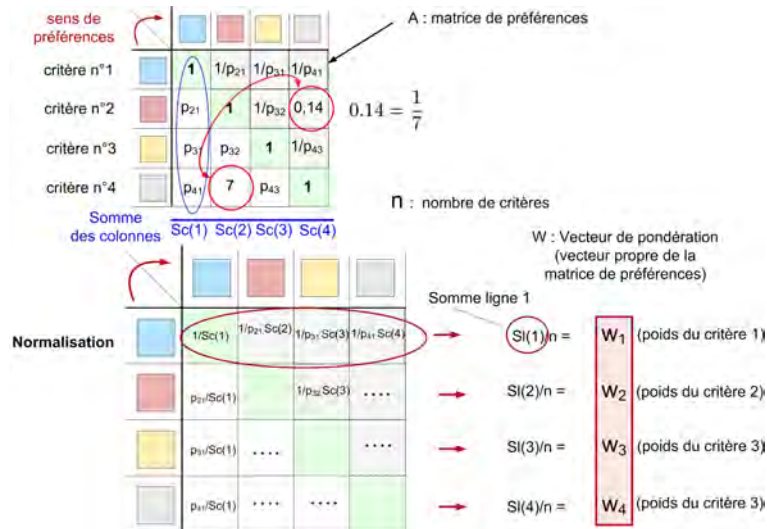


FIGURE 4.8 – Méthode *AHP* - Normalisation de la matrice de préférences et calcul du vecteur de pondération

Un exemple numérique pour 3 critères illustre le passage des préférences aux pondérations des critères (FIG. 4.9).

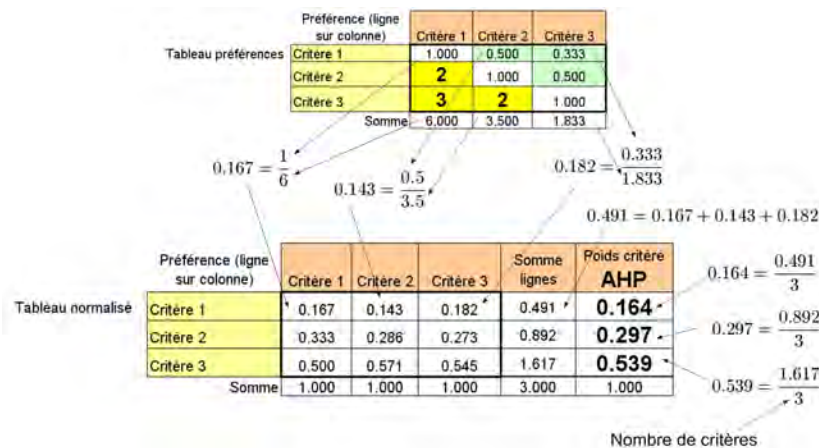


FIGURE 4.9 – Normalisation de la matrice de préférences et calcul du vecteur de pondération : exemple d'application numérique

Les préférences choisies dans la matrice de préférence peuvent être contradictoires. Le vecteur de pondération des critères est un vecteur propre de la matrice de préférences associé à la valeur λ représentant la cohérence moyenne (FIG. 4.10).

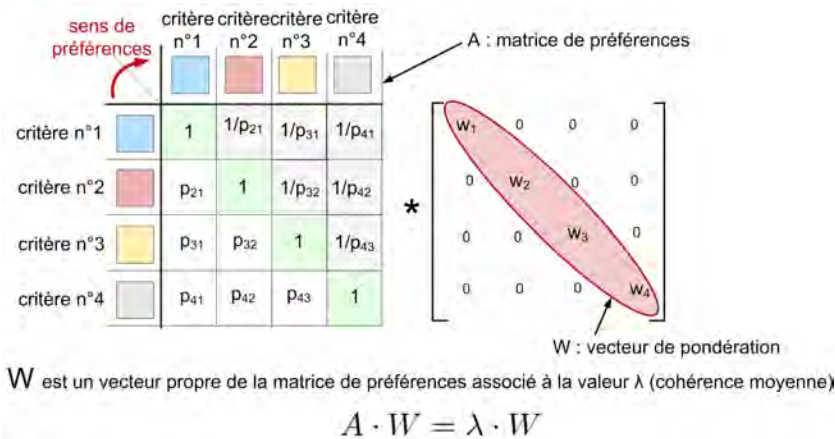


FIGURE 4.10 – Méthode AHP : signification de la cohérence moyenne

Les indices de cohérence de chaque critère sont calculés à partir du produit de la matrice de préférences et du vecteur de pondération. La cohérence globale des évaluations est mesurée par un ratio de cohérence qui doit rester inférieur à 10%. Un exemple numérique illustre le calcul du ratio de cohérence (FIG. 4.11).

4.2. L'AIDE MULTICRITÈRES À LA DÉCISION

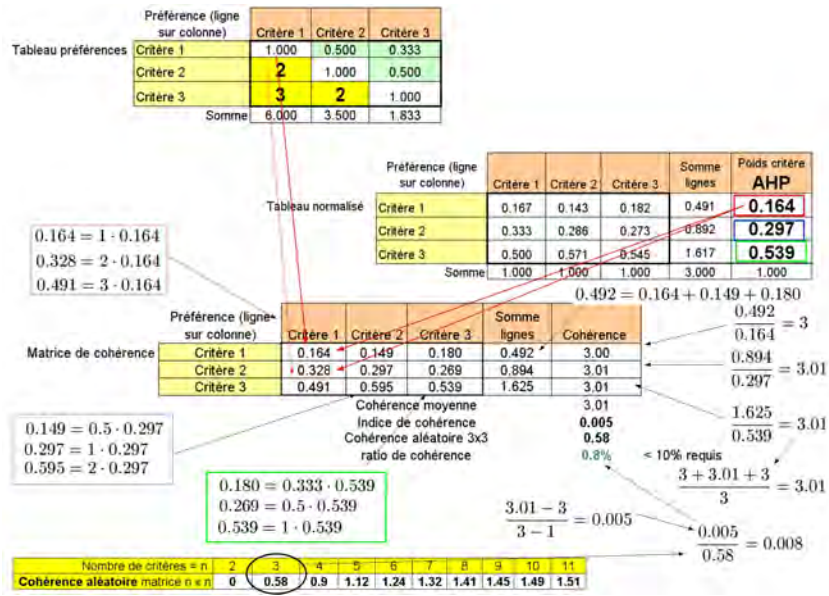


FIGURE 4.11 – Indices et ratio de cohérence : exemple numérique

La méthode du calcul du vecteur propre présentée ci-dessus est en fait une version simplifiée du véritable calcul complet. Th. Saaty considère que le calcul du vecteur propre de la matrice de préférences est la seule méthode acceptable pour obtenir des poids à partir d'une matrice de comparaison par paires (Saaty, 2003). Néanmoins, d'autres approches, basées par exemple sur la méthode des moindres carrés sont proposées notamment dans le cadre des formes multiplicatives de l'AHP (MAHP) (Stam and Duarte Silva, 2003; Smith, 2004).

Evaluation des alternatives Deux variantes d'évaluation sont possibles. D'apparences assez similaires, elles impliquent plus ou moins le décideur dans l'évaluation. Dans une approche *critère-solution*, l'évaluation des alternatives, réalisée par le décideur lui-même, se fait de manière comparative entre les alternatives (FIG. 4.12). La méthodologie de l'AHP utilisée pour définir les pondérations des critères à partir de comparaisons par paires est appliquée aux alternatives. L'agrégation des poids et de l'évaluation se fait de la racine vers les feuilles selon un principe qui s'apparente à une somme pondérée.

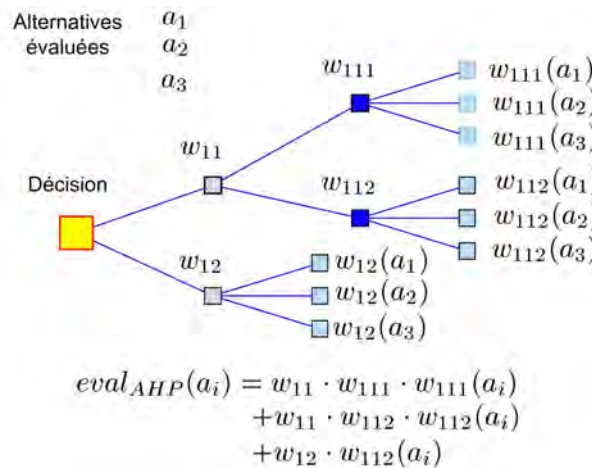


FIGURE 4.12 – Evaluation selon le principe *critère-solution* : méthode AHP originale

Une approche *critère-estimateur-solution* suppose que l'analyste ait effectué en amont le travail de comparaison entre critères en décomposant les critères terminaux en classes d'évaluation. Des pondérations sont attribuées par comparaison par paires entre les classes d'évaluation au moment de la conception du modèle. L'évaluation est limitée à l'affectation de ces classes aux alternatives sous forme d'un choix binaire (oui/non, 0 ou 1) pouvant être réalisé par un tiers (FIG. 4.13). Le véritable décideur est l'analyste (ou le groupe) qui a conçu l'application et qui a défini les seuils relatifs à la problématique de décision retenue (choix, tri ou rangement des alternatives).

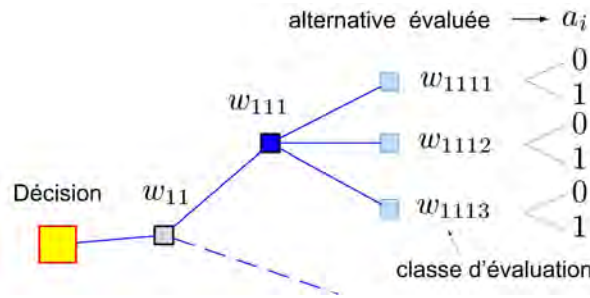


FIGURE 4.13 – Evaluation selon le principe *critère-estimateur-solution*

La méthode *AHP*, largement utilisée et...critiquée

Une synthèse des applications de la méthode *AHP* regroupées par domaines est proposée dans (Vaidya and Kumar, 2006). Une importante littérature existe autour des avantages et des inconvénients de la méthode *AHP* (Forman, 1993).

Les avantages La comparaison entre paires est intuitive et facilement compréhensible par les utilisateurs. Elle est plus accessible que la méthode *MAUT* dont les fonctions d'utilité sont définies par comparaison entre des loteries représentant un avis pré-existant dans l'esprit du décideur (Schärlig, 1985; Forman and Selly, 2002).

Les lacunes En dehors des réserves formulées à l'encontre des méthodes d'agrégation totale et de la somme pondérée en particulier (Vincke, 1989; Schärlig, 1985), l'*AHP* apparaît comme autant critiquée qu'elle est utilisée, avec ses partisans (Forman, 1993) et ses détracteurs. Les critiques portent notamment sur la mise en œuvre délicate pour de grands nombres d'alternatives, le caractère subjectif et peu représentatif des poids identifiés par la méthode et sur le délicat problème du renversement de rang. Pour éviter le renversement de rang (inversion du classement par ajout ou duplication de la même alternative), il est suggéré de recourir à une forme d'agrégation multiplicative (*MAHP*) (Stam and Duarte Silva, 2003; Smith, 2004) ou à la méthode *OWA*¹¹ (Yager, 1988). La méthode *MAHP* est basée sur le produit des évaluations élevés à une puissance correspondant au poids agrégé des critères terminaux. Elle implique d'adopter une échelle spécifique pour définir les préférences entre critères.

Dans sa version initiale basée sur un principe critère-solution, la méthode implique la comparaison de toutes les paires de solutions ou alternatives que l'on évalue selon les critères identifiés dans le cadre de la décomposition hiérarchique. Ainsi, pour n solutions, le nombre de comparaisons à effectuer pour chaque critère s'élève donc à $\frac{n(n-1)}{2}$. Les limitations cognitives qui justifient la décomposition hiérarchique¹² l'empêchent également de traiter simultanément un grand nombre d'alternatives. D'un point de vue pratique, le nombre de solutions à comparer est

11. Ordered Weighted Averaging aggregation operators

12. 7 ± 2 : nombre maximal de comparaisons simultanées par un humain (Miller, 1994)

donc un facteur limitant (cette remarque est d'ailleurs valable pour d'autres approches de type sur-classement).

Sur le fond, la signification des poids calculés est discutée comme ne reflétant pas les véritables préférences des décideurs (tout comme la théorie de l'utilité multi-attribut) (Linkov et al., 2006).

Enfin, dans sa version initiale, la méthode est soumise au renversement de rang : l'introduction de deux alternatives identiques dans une matrice de comparaison, modifie l'ordre des autres alternatives (Guitouni and Martel, 1998) (DelVecchio, 2006). Une condition dite "*des 10%*" a été proposée par Saaty pour éviter les problèmes de renversement de rang : les copies proches d'alternatives doivent être évitées. Deux alternatives sont considérées comme des "copies proches" si leurs valeurs de préférences ne sont pas différentes les unes des autres de plus de $\varepsilon = 10\%$ et ce pour tous les critères (Kumar and Ganesh, 1996).

4.3 Synthèse partielle sur l'aide multicritères à la décision

4.3.1 L'analyse multicritères et l'expertise des risques naturels

L'analyse multicritères peut être utilisée dans le cadre des risques naturels soit pour identifier et caractériser l'aléa (le phénomène), soit pour déterminer le niveau de risque par confrontation avec la vulnérabilité et les enjeux. Des applications peuvent par exemple être trouvées dans le domaine des risques géologiques (Merad et al., 2004), des séismes (Opricovic and Tzeng, 2003), des feux de forêts (Chen et al., 2001) ...

La majorité des applications se rapproche d'approches économiques qui constituent le socle classique de la décision dans le risque. La théorie économique propose en effet trois cadres d'analyse pour évaluer des solutions : les analyses coûts-avantages, coût-efficacité et les approches multicritères majoritairement dans le cadre de la théorie multi-attribut. Le principe général des approches économiques repose sur une valorisation monétaire des conséquences. Ceci consiste à utiliser une échelle commune basée sur l'évaluation monétaire des dommages pour estimer le risque et prendre des décisions (voir annexe D.2, p. 341) : le risque est mesuré par rapport à une perte entre la somme investie et le coût des dommages et la décision optimale est celle qui minimise la perte (ou maximise le gain). La rationalité limitée et les biais cognitifs attachés à cette approche rationnelle de la décision sont connus (voir 4.1.3, p. 86). En allant plus loin dans l'approche économique, il faut intégrer les actualisations monétaires associées à la valeur des biens marchands et non-marchands. Pour prendre en compte les effets non-marchands des décisions, des méthodes d'évaluation contingentes existent pour valoriser les conséquences intangibles et prendre en compte le comportement non rationnel du décideur en situation de risque (Munier, 1989) (Magne et Vasseur, 2006).

Cette approche utilisée dans le cadre des risques naturels pose de nombreux problèmes notamment au niveau de l'estimation des fonctions de vulnérabilité : à supposer que l'on sache définir le tracé, l'intensité d'une crue torrentielle, quels seront les dégâts occasionnés sur les enjeux et combien cela va-t'il coûter ? comment peut-on connaître le coût des dégâts réels causés par les phénomènes naturels ? (Brochot et al., 2003).

Ces méthodes reposent finalement sur des fonctions de vulnérabilité et des valeurs d'enjeux dont on ne caractérise que rarement l'incertitude d'estimation. L'incertitude porte essentiellement ici sur la réalisation du phénomène. Des travaux récents dans le domaine du génie paravalanche ont proposé des méthodes d'optimisation dans le cadre probabiliste bayésien qui prennent en compte l'incertitude sur la description des phénomènes, les fonctions de coût restant quant à elle, pour le moment, fixées a priori (Eckert et al., 2008b).

Dans le cadre d'une approche coûts-bénéfices, l'analyse multicritères hiérarchique (*AHP*) apparaît comme une autre alternative simple pour définir et communiquer sur des choix de gestion des risques. La méthode peut être utilisée pour choisir des stratégies de protection en compa-

rant les coûts d'investissement associés aux ouvrages et les gains exprimés en valeur monétaire correspondant aux dommages évités (Brundl et al., 2008).

Toutes ces méthodes ont l'avantage de reposer sur un socle théorique solide et incontestable liée à la théorie de la décision rationnelle. Le principe de l'optimisation et ses limites ont fait l'objet d'une analyse détaillée. Dans la pratique, nous avons également vu qu'il existe des formes plus qualitatives d'évaluation des composantes du risque. Les approches d'aide multicritères apparaissent donc adaptées à notre contexte avec une question : quelle méthode choisir ?

4.4 Conclusion

4.4.1 Principes retenus

L'aide multicritères à la décision répond par nature à l'objectif d'aide à la décision mais correspond à la forme et à l'esprit de la démarche d'expertise. La co-construction et la formulation des problèmes reposent sur une forte interaction entre les analystes, les experts et les décideurs. Cette approche est donc retenue pour deux raisons. Elle permet d'une part d'aider à la décision de manière interne à l'expertise mais aussi, d'autre part, d'établir un lien entre l'expertise "technique" et les utilisateurs dans le cadre de décisions de gestion "intégrée". Les méthodes multicritères apportent une contribution à la problématique de recherche mais présentent aussi des manques par rapport aux objectifs.

La traçabilité est assurée au travers de la formulation du problème de décision et l'explicitation des préférences formalisent des avis et permettent de tracer les modes de raisonnement, la nature des données utilisées. Elles constituent en ce sens un outil pour assurer la traçabilité des hypothèses.

L'approche descriptive est conforme aux analyses conduites dans le contexte de l'expertise sur son volet technique. Les concepts manipulés sont connus et peuvent être décrits par les experts. La méthode d'analyse hiérarchique multicritères (*AHP*) correspond à cette logique et propose une méthodologie analytique de décomposition d'un problème de décision en sous-critères. Elle présente des proximités évidentes avec les méthodes de modélisation conceptuelle de l'information et les approches systémiques. Elle apparaît comme une méthode intuitive proche des diagrammes cause-effet, pour formaliser naturellement les problèmes de décision. Elle est donc retenue en tant que support conceptuel pour formuler le problème de décision.

Les méthodes d'agrégation totale (de type *MAUT*, *AHP*) ne permettent pas de représenter des structures de préférence impliquant une incomparabilité et la non-transitivité des préférences. Elles sont cependant retenues en première approche pour deux raisons :

- Pour exploiter les outils empiriques existants (somme pondérée et ses variantes), les méthodes d'agrégation totales se rapprochent le plus des outils empiriques d'aide à la décision existants. Basées sur des structures de préférence de type pré-ordres totaux, elles produisent une évaluation sous forme d'un critère unique et permettent de répondre aux problématiques de choix, de tri et de rangement. Elles autorisent une application séquentielle de la méthode.
- Elles établissent et reposent sur une liaison explicite, certes criticable mais aussi tout à fait effective, entre les critères et une décision. Les fonctions d'utilité ou leurs équivalents sont des éléments importants et localisés dans la démarche pour expliciter les choix des experts et assurer la traçabilité de la décision. Les fonctions d'utilité transforment des critères initiaux dans une même échelle pour autoriser leur agrégation. Leur élaboration nécessite un effort cognitif important de la part des analystes pour définir des préférences

pour et entre tous les critères. Les poids utilisés dans les méthodes élémentaires nécessitent d'être réellement considérés comme des taux de substitution. Les approches basées sur la théorie de l'utilité multi-attribut exploitent en majorité des loteries qui sont connues pour introduire des biais de la part des utilisateurs et qui ne seront pas utilisées dans la suite. La méthode d'explicitation des poids et de valuation des alternatives utilisée dans le cadre de l'analyse multicritères hiérarchique (*AHP*) est une alternative permettant d'intégrer une forme de flou dans l'évaluation qui sera exploitée dans les développements.

Bien que la notion de risque sous-tende toute la problématique, nous abordons, en première approche, le problème de décision dans un univers certain. La décision n'est pas évaluée par rapport à des conséquences incertaines relatives aux évaluations. L'objectif reste donc de prendre en compte et de faire état de l'imperfection de l'information au niveau de l'évaluation des critères de la décision.

4.4.2 Deux enjeux de développement

Deux enjeux de développement émergent pour répondre à la problématique et aux objectifs¹³. Le premier enjeu concerne le diagnostic, la restructuration de modèles de décision existants et l'analyse de la pertinence des méthodes d'aide multicritères à la décision dans le cadre de l'expertise. Le second enjeu porte sur la représentation, le traitement et la prise en compte de l'imperfection de l'information évaluée dans les décisions au travers des méthodes d'aide multicritères (FIG. 4.14).

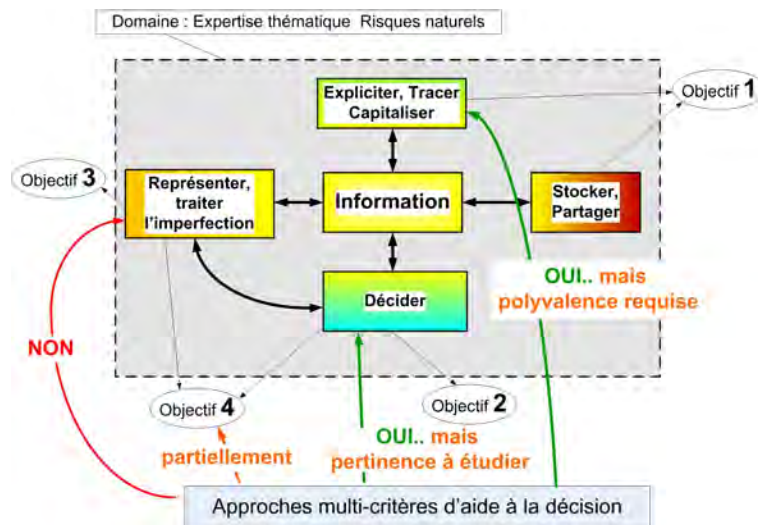


FIGURE 4.14 – Contributions des approches multicritères aux objectifs de la thèse

Enjeu n°1 : Diagnostic, pertinence et adaptation des méthodes Ce premier enjeu concerne le diagnostic et la reconfiguration de problèmes de décision structurés hiérarchiquement. Pour réutiliser des modèles d'aide à la décision existants, étudier l'applicabilité des méthodes d'aide multicritères dans le cadre d'approches qualitatives d'analyse de risque mais aussi de structurer le problème de décision sous une forme compatible avec un processus de fusion d'information, l'enjeu est de :

- fournir un cadre de structuration et de diagnostic des modèles existants permettant notamment d'analyser les structures de préférences et de reformuler les modèles existants sous de multiples formes hiérarchiques.

13. voir chap. 2.5.2, p. 64

- mesurer l'adéquation et la contribution des méthodes d'aide multicritères à la combinaison qualitative des composantes du risque.

Les méthodes peuvent être jugées pertinentes si leurs principes et modes d'agrégation permettent de représenter les structures de préférences rencontrées et d'aider les décisions à prendre dans le cadre de l'expertise des risques naturels. Il s'agit notamment de vérifier si les méthodes empiriques existantes, principalement basées sur des principes d'agrégation par somme pondérée, sont adaptées aux problèmes de décision rencontrés. Dans ces approches, la mauvaise interprétation des poids, qui sont en fait des taux de substitution, est assez fréquente. Le recours aux utilités additives nécessite de respecter les principes d'indépendance préférentielle des critères. L'enjeu est donc de vérifier si des structures de préférences implicites servant à évaluer le risque par le biais de tableau croisant les composantes du risque tels que l'aléa et la vulnérabilité peuvent exploiter les résultats de ces méthodes d'inspiration multicritères pour produire une évaluation. Il s'agira par exemple, à partir d'une évaluation multicritères d'un site exposé, de retrouver les classements utilisés de manière empirique et non tracée dans le cadre des approches de caractérisation du risque. Ceci nécessitera de valider l'utilisation de valeurs d'utilité affectées à l'aléa et à la vulnérabilité et le principe d'utilité additive. Cette approche sera développée dans le chapitre 7 (FIG. 4.15).

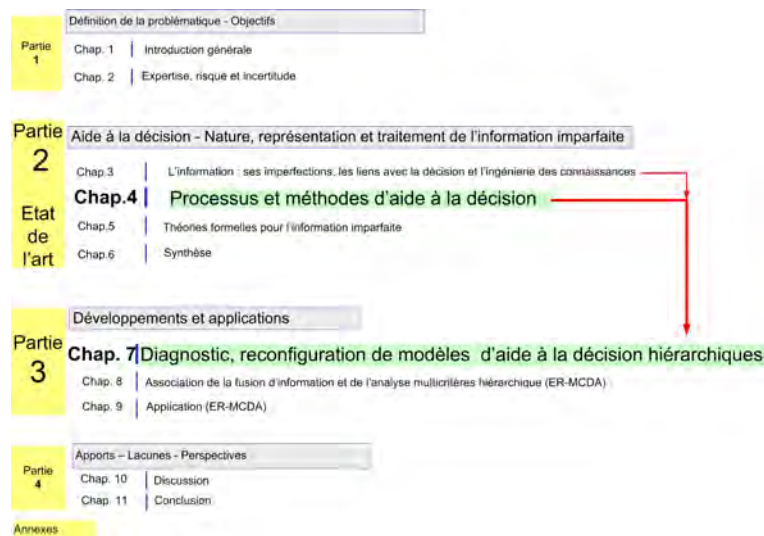


FIGURE 4.15 – Le diagnostic et la reconfiguration de modèles de décision est un premier développement de la thèse

Prise en compte de l'imperfection de l'information dans la décision Un objectif du travail (objectif n°4) concerne la prise en compte de l'imperfection de l'information dans le processus de décision. Dans leur forme originale, l'imperfection de l'évaluation des critères n'est pas prise en compte de manière native par les méthodes d'aide multicritères à la décision. Elles permettent de décrire un processus de décision en agrégeant des avis sur des critères hétérogènes mais sans prendre en compte des évaluations incertaines, imprécises, conflictuelles de ces critères. Il existe cependant des méthodes qui associent l'aide multicritères à la décision et des représentations de l'imperfection de l'information. Une analyse bibliographique sera développée sur cet aspect dans le chapitre 6 après avoir présenté au chapitre 5 les théories formelles de l'incertain utilisées dans ces approches mixtes. A ce stade, dans le contexte de l'expertise des risques naturels, intégrer l'incertitude et plus généralement l'imperfection associée à l'information utilisée dans le cadre des méthodes multicritères servant à évaluer le risque reste donc un enjeu.

Chapitre 5

Les approches théoriques pour l'information imparfaite et paradoxale

L'origine des "nouvelles" théories de l'incertain

Une théorie de manipulation de l'incertitude totalement opérationnelle doit (Klir and Smith, 2001) :

- proposer une représentation mathématique ;
- développer un procédé de calcul pour manipuler (propager) l'incertitude ;
- mesurer l'incertitude de façon explicite ;
- proposer une méthodologie pratique de mise en œuvre des concepts.

Il existe plusieurs cadres théoriques pour représenter et traiter l'information incertaine et imprécise et décider dans un contexte d'incertitude ou de risque.

La théorie des probabilités constitue le cadre classique et historique. Elle a longtemps été considérée comme l'unique moyen pour mesurer et prendre en compte l'incertitude. Largement utilisée, y compris dans le contexte des risques naturels, la notion de probabilité n'est pas, à la base, adaptée pour représenter une vision subjective de l'information et des incertitudes d'ordre psychologique telle que la fiabilité d'un informateur (Bouchon-Meunier, 1995).

D'autres théories plus récentes¹, issues des travaux dans le domaine de l'intelligence artificielle, sont apparues au cours de la seconde moitié du XX^{ème} siècle² et permettent de mieux prendre en compte les informations vagues, incertaines, imprécises et paradoxales entre les différentes sources. Il s'agit notamment des théories des ensembles flous, des possibilités et des fonctions de croyance au travers de la théorie classique de *Dempster-Shafer* (*DST*) et de la théorie de *Dezert-Smarandache* (*DSmT*) développée plus récemment. Ces différents cadres théoriques, peuvent être utilisés pour représenter la connaissance dans les cas d'information imparfaite.

Ce chapitre décrit les principes méthodologiques, les convergences et l'intérêt de ces théories dans la perspective d'application à notre problématique d'expertise associant décision, sources multiples et information imparfaite.

5.1 Les probabilités

Les approches mises en œuvre dans le cadre de la gestion des risques pour manipuler et caractériser l'incertitude, s'inscrivent majoritairement dans le cadre probabiliste avec des déve-

1. qualifiées de "nouvelles" théories de l'incertain

2. voir historique des théories en annexe F.1, p. 351

loppements récents dans la perspective bayésienne (Meunier et al., 2004) (Eckert et al., 2008a). Seuls les principes généraux sont rappelés³.

5.1.1 Principes de base

Un espace probabilisé est un triplet noté (Ω, \mathcal{A}, P) avec Ω l'ensemble de tous les résultats possibles, \mathcal{A} l'ensemble de tous les événements auxquels on peut attribuer une probabilité et P la mesure de la probabilité dont les valeurs sont comprises entre 0 et 1. Une probabilité P est une fonction qui associe à un événement A , un nombre réel compris entre 0 et 1. Soit un espace probabilisable (Ω, \mathcal{A}) , l'application $P : \mathcal{A} \rightarrow \mathbb{R}$, définie sur l'ensemble des événements associés à l'espace fondamental Ω est une mesure de probabilité si elle satisfait les trois axiomes suivants :

- $\forall A \in \mathcal{A}, 0 \leq P(A) \leq 1$. Les probabilités sont toujours positives et inférieures ou égales à 1 ;
- $P(\text{événement certain}) = 1$. Ω représente un événement certain ;
- $A \cap B = \emptyset \implies P(A \cup B) = P(A) + P(B)$. Si deux événements sont disjoints ou incompatibles, leurs probabilités s'ajoutent ;

Soit un événement $A \in \Omega$ et son complémentaire noté \bar{A} . La connaissance de la probabilité de A définit complètement celle de son contraire \bar{A} soit $P(\bar{A}) = 1 - P(A)$.

5.1.2 Les limites des probabilités

Les probabilités sont parfois distinguées en probabilités objectives et subjectives. Une probabilité objective résulte d'observations des réalisations d'un événement (approche fréquentiste). Une probabilité peut correspondre à deux contextes : il peut s'agir d'une probabilité a priori donnée par un décideur avant observation dans l'optique d'une mise à jour ultérieure (approche bayésienne) ou d'une probabilité sans base objective (Pomerol, 2006). Les probabilités présentent certaines limites pour représenter l'information incertaine. Les probabilités constituent un formalisme puissant et rigoureux voire idéal (O'Hagan and Oakley, 2004) qui reste difficile à mettre en œuvre quand l'information se réfère à des phénomènes non clairement reproductibles à l'identique (témoignages, élections). Les probabilités sont alors subjectives et représentent plus des degrés de confiance dans ce qu'un agent perçoit comme événement pertinent pour le problème abordé. Cette vision subjective des probabilités ont été introduite par De Finetti (de Finetti, 1937)⁴ sans toutefois permettre de justifier l'additivité des probabilités.

Pour certains, les probabilités peuvent prendre en compte les différentes formes d'incertitude de l'information (O'Hagan and Oakley, 2004). D'un autre côté, la théorie des probabilités n'est pas la mieux adaptée pour représenter l'incertitude par ignorance ou épistémique (Sentz and Ferson, 2002)⁵. Les probabilités ne permettent pas de différencier une conclusion issue d'un état de croyance incertain d'une conclusion issue d'un état d'ignorance (Lardon, 2004). Plusieurs difficultés ont été identifiées (Dubois et Prade, 2006)⁶ :

- L'usage unique d'une probabilité unique comme outil de représentation de l'incertitude ne permet pas de faire la différence entre l'information incomplète sur une situation et le cas où la situation est réellement aléatoire. Sans savoir si un dé est pipé, postuler une distribution uniforme sur les faces du dé ne correspond qu'à un principe de symétrie et pas à la connaissance réelle du dé ;
- La réalité peut être représentée sous des référentiels différents selon les observateurs : l'un distinguera des situations qui seront ignorées par un autre. Il sera alors difficile de repré-

3. voir en annexes F.4 (p. 360) et D (p. 341) pour des définitions complètes

4. voir aussi une perspective épistémologique (Morini, 2007)

5. p.8 – 10

6. p.129

senter des états de connaissance compatibles entre eux par des distributions de probabilité uniques sur chaque élément des référentiels. L'exemple suivant est adapté (d'après (Shaffer, 1976)) au cas des crues torrentielles. On imagine l'existence de lave torrentielle sur un bassin versant torrentiel. L'agent ne sait pas s'il y en a ou pas. l représente l'affirmation de l'existence d'une crue de type lave torrentielle et $\neg l$ son contraire. En l'absence de connaissances, un premier observateur propose le référentiel $S_1 = \{l, \neg l\}$ avec une distribution de probabilité $P_1(l) = P_1(\neg l) = \frac{1}{2}$. Un autre individu va vouloir distinguer le cas de lave torrentielle de type granulaire (lg) ou boueuse (lb) et proposera un autre référentiel $S_1 = \{lg, lb, \neg l\}$ avec une distribution $P_2(lg) = P_2(lb) = P_2(\neg l) = \frac{1}{3}$. l représente la disjonction (union) de lg et lb . On a donc $P_2(lg \cup lb) = \frac{2}{3}$ et $P_1(l) = \frac{1}{2}$. Les distributions de probabilité P_1 et P_2 sont incompatibles alors qu'elles sont supposées représenter la même réalité.

5.2 La logique floue

Les théories des ensembles flous (Zadeh, 1965) et des possibilités (Zadeh, 1978) (Dubois and Prade, 1988) sont les deux théories constituant le cadre global de ce qui est communément appelé la "logique floue" (Bouchon-Meunier, 1995)⁷.

5.2.1 Théories des ensembles flous

La théorie des intervalles a proposé une première formalisation des imprécisions de caractère numérique (Moore, 1966). La théorie des sous-ensembles flous a ensuite permis la représentation de la forme la plus générale d'imprécision exprimée sous forme linguistique (Zadeh, 1965). Elle repose sur l'hypothèse de fonctions d'appartenance partielle à un ensemble. La notion de flou concerne l'imprécision issue de l'appartenance partielle d'un élément donné et bien défini à un ensemble dont les frontières ne sont pas clairement définies (Smets, 1991).

La représentation d'une proposition comme une entité booléenne pouvant être vraie ou fausse n'est en effet pas toujours adaptée : "*le volume du glissement est grand, l'intensité est forte*". La notion de *sous-ensemble flou* permet d'évaluer une proposition sur une échelle d'attributs ordonnés. Les sous-ensembles flous sont particulièrement adaptés dans les cas d'information exprimée en langage naturel se référant à un attribut numérique. On parle dans ce cas d'*information linguistique graduelle* (Dubois et Prade, 2006)⁸. Les variables linguistiques ce type prennent leurs valeurs dans un ensemble fini de termes constituant le *domaine* de la variable. Les termes *intact*, *dégradé*, *détruit* constituent par exemple le domaine de la variable *état du barrage* (Dubois et Prade, 2006).

X est l'ensemble de référence sur lequel les événements sont définis. Un sous-ensemble flou A de X est défini par une fonction d'appartenance μ_A telle que :

$$\begin{cases} \mu_A : X \rightarrow [0, 1] \\ x \rightarrow \mu_A(x) \end{cases}$$

$\mu_A(x)$ mesure le degré d'appartenance de l'élément x à A . Si μ_A ne prend que les valeurs 0 ou 1, A est un sous-ensemble classique de X . Plusieurs éléments permettent de décrire un sous-ensemble flou (Bouchon-Meunier, 1995; Bouchon-Meunier et al., 2003) (FIG. 5.1).

Le support du sous-ensemble flou A de X , noté $supp(A)$, est la partie de X sur laquelle la fonction d'appartenance μ_A n'est pas nulle soit $supp(A) = \{x \in X / \mu_A(x) \neq 0\}$.

7. p.5

8. p.120

Le noyau d'un sous-ensemble flou A de X , noté $noy(A)$, est la partie de X sur laquelle la fonction d'appartenance vaut 1 soit $noy(A) = \{x \in X / \mu_A(x) = 1\}$.

La hauteur d'un sous-ensemble flou A de X , noté $h(A)$, est la plus grande valeur prise par la fonction d'appartenance μ_A soit $h(A) = \sup_{x \in X}(\mu_A(x))$.

Enfin, on définit la α -coupe du sous-ensemble A de X (ou sous-ensemble de niveau α associé à A) comme le sous-ensemble $A_\alpha = \{x \in X / \mu_A(x) \geq \alpha\}$ avec $\alpha \in [0, 1]$. Le support noté $supp(A)$ correspond à une valeur $\alpha = 0$ soit A_0 . Le noyau noté $noy(A)$ correspond à une valeur $\alpha = 1$ soit A_1 .

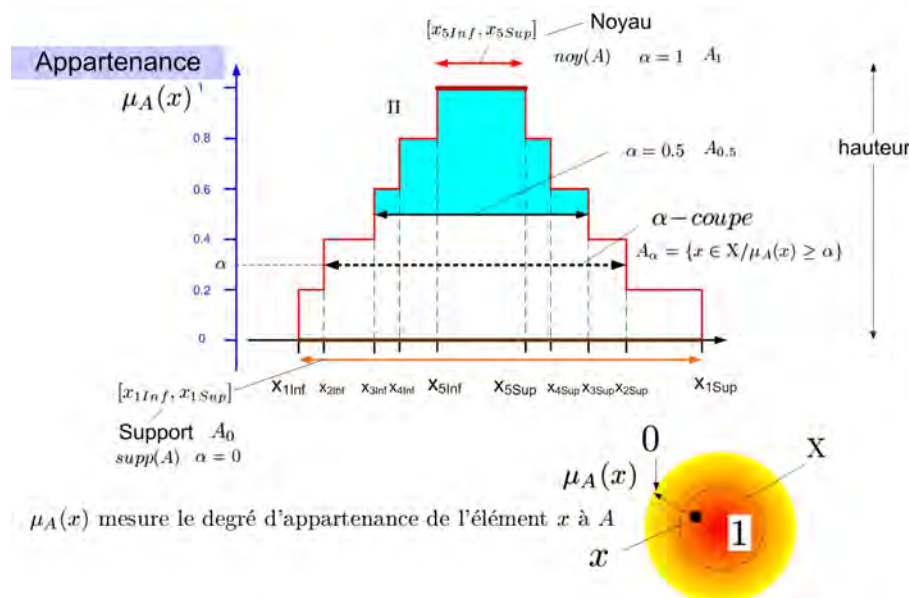


FIGURE 5.1 – Définition d'un sous-ensemble flou

Les sous-ensembles permettent la représentation de variables linguistiques. Par exemple, la pente d'un torrent peut être faible, moyenne ou forte et correspondre à des catégories de rivière de plaine, rivière torrentielle et torrent. Le passage d'une catégorie à l'autre est progressif. Une pente de 5% correspond encore à une rivière torrentielle mais qui commence à avoir des caractéristiques proches de celles d'un torrent (FIG. 5.2). Il convient de noter ici le caractère arbitraire des bornes des intervalles flous et de leurs formes. La détermination de ces intervalles proviendra dans notre problématique essentiellement de jugements d'expert.

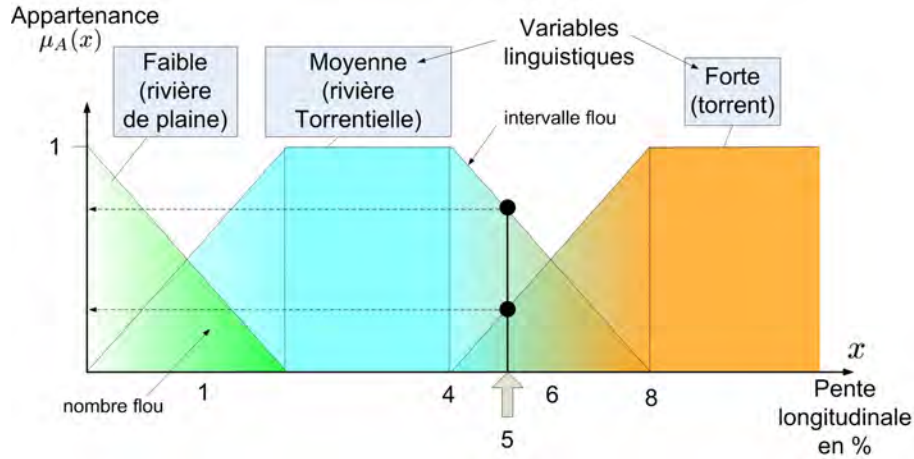


FIGURE 5.2 – Représentation d'une variable linguistique par un sous-ensemble flou

Les données floues peuvent être représentées sous forme d'intervalles ou de nombres flous dont une description paramétrique est donnée en annexe F.2 (p. 352).

5.2.2 Théorie des possibilités

La théorie des possibilités est basée sur une extension de la logique classique pour manipuler des connaissances imparfaites dans un cadre non probabiliste. La théorie des possibilités concerne des propositions alors que la théorie des ensembles flous ne considère qu'une appartenance à un ensemble.

Définitions

Etant donné un ensemble de référence X , on attribue à chaque élément A défini sur X (A est un élément de l'ensemble $P(X)$ des sous-ensembles de X), une mesure de confiance \mathcal{K} évaluant à quel point cet événement est possible (Dubois, 1983; Dubois et Prade, 2006; Bouchon-Meunier, 1995; Lardon, 2004). Une mesure de confiance \mathcal{K} est une fonction définie sur l'ensemble $P(X)$, prenant ses valeurs dans $[0, 1]$ et telle que pour une famille d'ensembles quelconques $A_i \in P(X)$, :

$$\begin{cases} \mathcal{K}(\bigcup_{i=1,2,\dots} A_i) \geq \sup_{i=1,2,\dots} \mathcal{K}(A_i) \\ \mathcal{K}(\bigcap_{i=1,2,\dots} A_i) \leq \min_{i=1,2,\dots} \mathcal{K}(A_i) \end{cases}$$

Ce qui entraîne les conséquences suivantes :

- Soit $A \in P(X)$, si A est certain, alors $\mathcal{K}(A) = 1$, si A est impossible alors $\mathcal{K} = 0$
- $\forall (A, B) \in P(X)^2$, on a $A \subseteq B \implies \mathcal{K}(A) \leq \mathcal{K}(B)$

Les mesures de nécessité N et de possibilité Π sont des mesures de confiance correspondant aux cas limites suivants. La mesure de nécessité N est telle que :

$$\begin{cases} N(A) = 1 \iff A \text{ est certain} \\ \forall (A, B) \in P(X)^2, \text{ on a } N(A \cap B) = \min(N(A), N(B)) \end{cases}$$

La mesure de possibilité Π est telle que :

$$\begin{cases} \Pi(A) = 0 \iff A \text{ est impossible} \\ \forall (A, B) \in P(X)^2, \text{ on a } \Pi(A \cup B) = \max(\Pi(A), \Pi(B)) \end{cases}$$

On n'a donc pas d'additivité des possibilités : $\Pi(A \cup B) \neq \Pi(A) + \Pi(B)$. Les deux mesures de possibilité Π et de nécessité N sont liées par la relation $N(A) = 1 - \Pi(\bar{A})$: un événement A est certain si son contraire est impossible. Plus on est certain de la réalisation de A , moins l'événement complémentaire est possible. Dans le cas où X est fini, une distribution de possibilité (FIG. 5.3) munit X d'une mesure de possibilité Π et de nécessité N correspondant à une fonction $\pi : X \rightarrow [0, 1]$ telle que $\forall A \subseteq X$:

$$\begin{cases} \Pi(A) = \sup_{w \in A} \pi(w) \\ N(A) = \inf_{w \in \bar{A}} (1 - \pi(w)) = 1 - \Pi(\bar{A}) \end{cases}$$

Les distributions de possibilités peuvent être fusionnées en utilisant toutes les méthodes existantes pour les ensembles flous et suivant des règles conjonctives (intersection des distributions) ou adaptatives (intersection et union). Le degré de cohérence entre les sources peut être mesuré mais quand la cohérence devient trop faible, les résultats de fusion sont instables (Dubois et Prade, 2006).

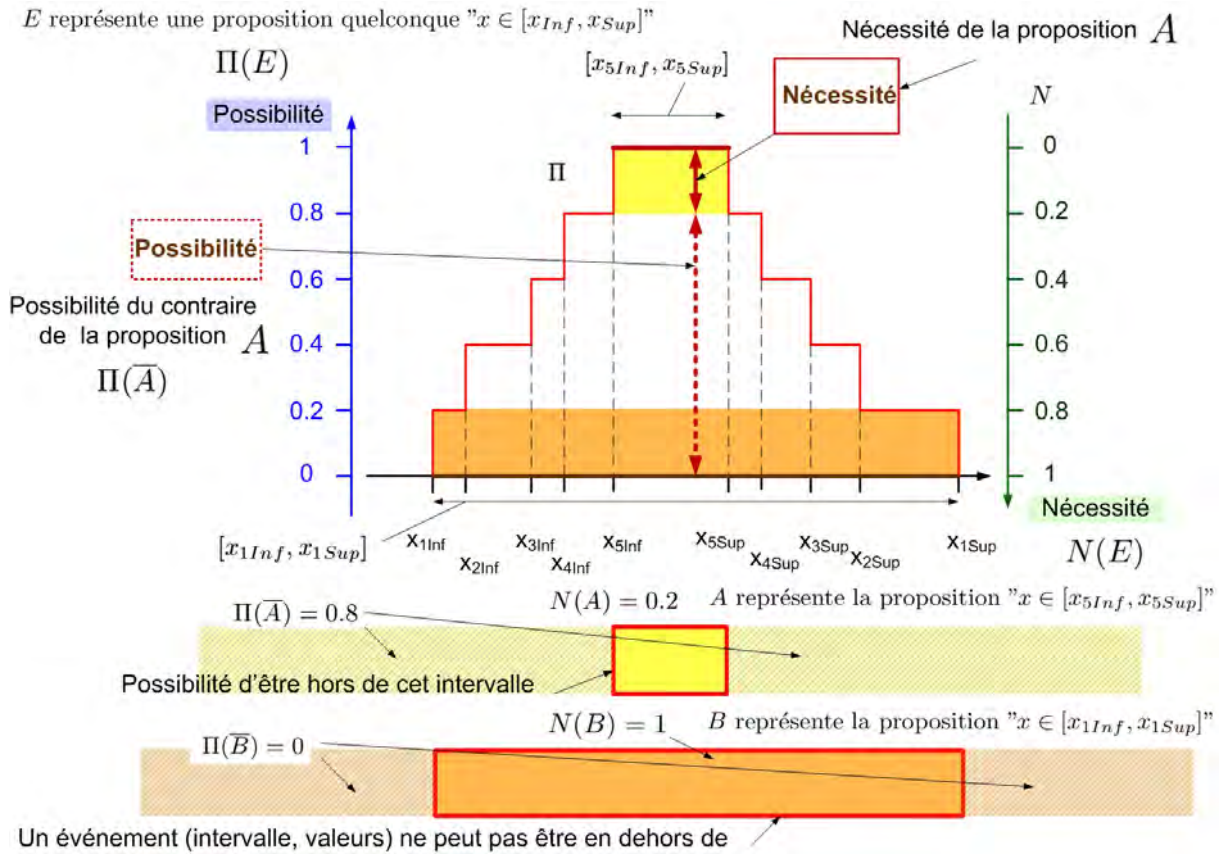


FIGURE 5.3 – Mesures de possibilité et de nécessité issues d'une distribution de possibilité

Une représentation partielle de l'imperfection de l'information

Une distribution de possibilité peut être considérée comme la fonction d'appartenance de l'ensemble flou des éléments possibles pour la solution recherchée (Masson, 2005). Le degré de nécessité correspond à ce qui peut être déduit de l'information disponible. Il correspond au degré de certitude que l'on peut attribuer à la réalisation de l'événement. Le degré de possibilité mesure le degré avec lequel l'événement est susceptible de se réaliser : il n'a pas d'interprétation en terme de fréquence.

En conclusion, la mesure de nécessité permet de décrire l'incertitude sur différentes propositions définies sur l'ensemble des états possibles. Elle mesure un degré de confiance dans une information imparfaite et partielle. L'ignorance totale peut être représentée par une nécessité nulle. L'imprécision de l'information peut être représentée par les différents états possibles (des intervalles dans un cadre numérique). Ce cadre ne permet par contre pas de représenter la fiabilité des sources d'information.

5.3 Propager les imperfections

Sur la base d'une utilisation conjointe des théories des probabilités et des possibilités, l'imperfection de l'information peut être prise en compte et propagée dans le cadre de modèles numériques (Oberkampf et al., 2002)(Oberkampf et al., 2004). Ces modèles sont en effet des sources d'information exploités dans le cadre de l'expertise et la confiance dans les résultats (provenant des hypothèses du modèle ou des données) est un élément déterminant dans la conduite d'une expertise .

Les analyses d'incertitude et de sensibilité

L'analyse d'incertitude évalue l'incertitude sur le résultat global. L'analyse de sensibilité identifie quels sont les facteurs d'entrée incertains contribuant le plus à l'incertitude des résultats produits par un modèle. La notion de facteur est considérée au sens large comme une caractéristique quelconque pouvant être changée dans un modèle préalablement à son exécution. Il peut ainsi s'agir aussi bien de valeurs numériques introduites dans le code de calcul que, par exemple, d'options de calcul relatives au choix d'un type de modèle. Les approches probabilistes dont celles dites de Monte-Carlo sont largement utilisées dans le cadre de méthodologies opérationnelles (Magne et Vasseur, 2006) et d'outils d'analyse de l'incertitude et de la sensibilité basée sur des analyses de la variance (Saltelli et al., 2004). Dans ce cadre, la difficulté essentielle provient du choix et de la définition des distributions de probabilités au regard de la connaissance disponible souvent manquante dans certains contextes des risques naturels : il n'existe par exemple pas de bases de données relatives aux crues torrentielles et les données hydrologiques sont souvent absentes et toujours incomplètes (Obled et al., 2006).

Les approches hybrides

La théorie des probabilités est le cadre classique pour caractériser et propager l'incertitude dans les modèles. Elle peut être mise en œuvre sans données par exemple en postulant des distributions de probabilités sur les variables à dire d'expert. Les résultats doivent alors être considérés avec prudence par rapport à la subjectivité des informations saisies (forme, paramètres des distributions de probabilités). Les situations d'évaluation des risques environnementaux correspondent à des contextes de faible disponibilité de données ou des avis à "dire d'expert" sont requis pour pallier ce manque de données (Mercat-Rommens et al., 2008). Pour prendre en compte l'hétérogénéité et le faible volume d'information dont dispose effectivement le décideur, des approches dites "hybrides" ont été proposées pour évaluer un risque. Associant les théories des possibilités, des fonctions de croyance et des probabilités, elles concernent les domaines d'application qui utilisent, d'une part, des modèles de simulation numérique et, d'autre part, des données d'entrée provenant d'avis et de jugement d'expert. Dans un tel cas, les distributions de probabilités sont en effet jugées trop informatives par rapport aux informations réellement disponibles. Développées dans le contexte de la pollution des sols (Guyonnet et al., 2003; Baudrit et al., 2007) et de la contamination par des éléments radioactifs (Baudrit et al., 2005b), ces méthodes mettent en œuvre des théories de représentation formelles de l'incertain différentes des probabili-

tés classiques. La théorie des possibilités numériques et la théorie des fonctions de croyance sont utilisées pour représenter la connaissance imparfaite exprimée par les experts sur les variables des modèles. Ces approches s'inscrivent dans une interprétation probabiliste de la théorie des fonctions de croyances en définissant des familles de probabilités hautes et basses par opposition à l'approche purement "crédale"⁹ où les masses de croyance sont définies indépendamment de notions de probabilités (FIG. 5.4). Au niveau pratique, les outils développés pour associer ces approches possibilistes et probabilistes reposent sur l'utilisation dans des modèles numériques de données représentées non plus uniquement par des distributions de probabilités mais par des distributions de possibilités. Ceci revient alors à considérer qu'une variable n'est pas décrite par une seule distribution de probabilité mais par un encadrement de distributions hautes et basses. Des environnements de calcul hybrides permettent de réaliser le couplage avec les modèles numériques en gérant la saisie des données et l'exploitation des résultats de simulation (Chojnacki, 2005).

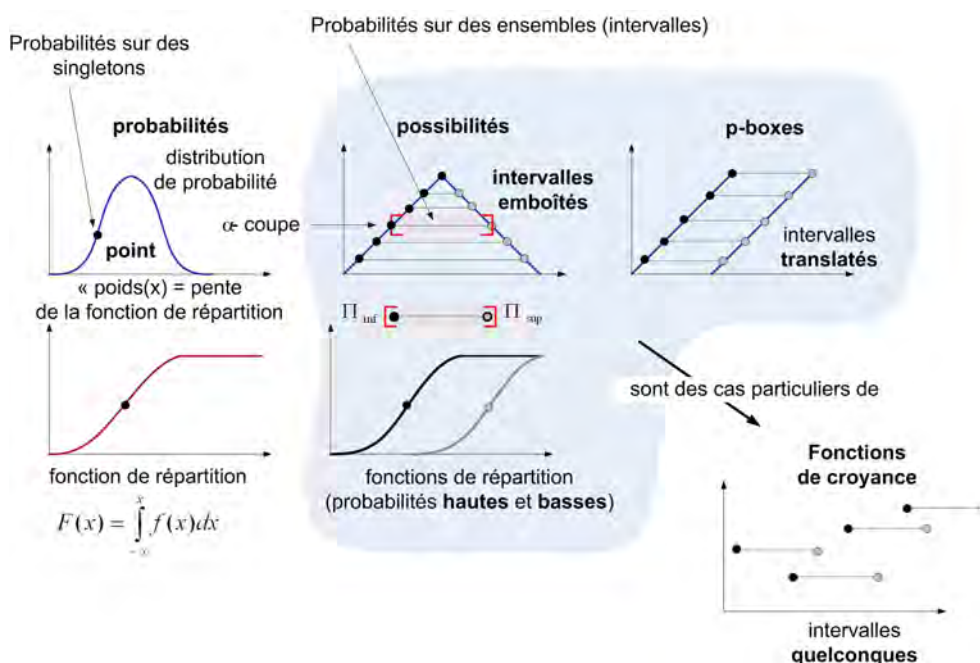


FIGURE 5.4 – Approche hybride : les distributions de probabilités sont remplacées par des distributions de possibilités

Ces approches sont donc un progrès dans la prise en compte de l'imperfection des données de modèles numériques. Les modèles sont des sources d'information dont les résultats sont interprétés. Elles peuvent donc fournir des éléments d'appréciation relatifs à la qualité et la fiabilité des résultats dans une décision plus globale. Elles ne s'appliquent par contre pas directement à la caractérisation de l'incertitude associée aux hypothèses du modèle et à un contexte de décision multicritères et ne sont pas exploitées dans le cadre de ce travail.

5.4 Théorie de l'évidence ou des fonctions de croyances

La théorie de l'évidence ou théorie des fonctions de croyance permet de manipuler des degrés de confiance (ou masses de croyance) associés à la validité d'une information en n'imposant plus la propriété d'additivité fondamentale dans le cadre de la théorie des probabilités et en généralisant

9. du latin *credo* : croire

la théorie des probabilités et des possibilités (Bouchon-Meunier, 1995). Ces masses de croyance s'appliquent non plus seulement à des singletons comme dans la théorie des probabilités mais à des sous-ensembles.

La fusion d'information est un des atouts essentiels de cette théorie. Elle peut être définie de la manière suivante : *"La fusion d'information consiste à combiner des informations issues de plusieurs sources pour prendre des décisions, répondre à des questions"* (Bloch and al., 2001)¹⁰. Cette fusion d'information consiste à produire une fonction de masse de croyance unique à partir de plusieurs fonctions de masse de croyance issues de sources distinctes (Lefevre et al., 2002). Le processus de fusion peut être statique dans le cas où les données sont toutes disponibles avant la fusion ou dynamique quand les données sont fusionnées au fur et à mesure en fonction de leur disponibilité ;

La théorie des fonctions de croyance, également nommée théorie de *Dempster-Shafer* (*DST*)¹¹ ou théorie de l'évidence a été proposée par Shafer (1976) sur les bases des travaux de Dempster (1967) sur les bornes inférieure et supérieure d'une famille de distributions de probabilité (FIG. 5.4). Plusieurs évolutions de la théorie initiale ont suivi. Un cadre théorique indépendant de la théorie des probabilités a ensuite été formulé par Smets and Kennes (1994) dans le cadre du modèle des croyances transférables (*TBM*)¹². Enfin, la théorie de *Dezert-Smarandache* (*DsmT*)¹³ ou Théorie du raisonnement plausible et paradoxal constitue l'évolution la plus récente. Des revues des domaines d'application de la théorie de *Dempster-Shafer* (*DST*) et de la théorie de *Dezert-Smarandache* (*DsmT*) peuvent être trouvées respectivement dans (Sentz and Ferson, 2002) et (Dezert and Smarandache, 2004)¹⁴.

5.4.1 La théorie de Dempster-Shafer (*DST*)

Principes

La combinaison des différentes informations dans le cadre de la théorie de l'évidence nécessite de définir un espace de fusion commun ou *cadre de discernement* (Bloch and al., 2001). Dans la théorie de *Dempster-Shafer*, ce *cadre de discernement* noté $\Theta = \{\theta_1, \dots, \theta_n\}$ est un ensemble discret, fini, exhaustif de n hypothèses élémentaires et exclusives muni des opérateurs ensemblistes classiques de conjonction \cup et de disjonction \cap . Les hypothèses notées θ_i correspondent à des notions vagues et imprécises. Le cadre de discernement contient toutes les solutions du problème et sa définition est une des principales difficultés liées à l'utilisation de la théorie des fonctions de croyance (Vannoorenberghe, 2003). Θ représente l'événement certain et \emptyset représente l'événement impossible.

Dans le cadre de la théorie de *Dempster-Shafer*, l'ensemble des parties de Θ ($P(\Theta)$) est noté 2^Θ et s'appelle le *power-set*. Il est défini comme l'ensemble des sous-ensembles de Θ quand tous les éléments θ_i sont disjoints (voir l'exemple en FIG. 5.6, p. 123). Une connaissance imparfaite affectée à un élément de 2^Θ est représentée par un jeu de *masse généralisée de croyances* ou masse de croyance (en anglais *basic belief assignment* ou *bba*) est défini comme la fonction $m(\cdot)$ telle que :

$$\begin{cases} m(\cdot) : 2^\Theta \rightarrow [0, 1] \\ m(\emptyset) = 0 \\ \sum_{X \in 2^\Theta} m(X) = 1 \end{cases}$$

10. Groupe de travail européen FUSION

11. Dempster-Shafer Theory

12. Transferable Belief Model

13. Dezert-Smarandache Theory

14. voir aussi volumes 2 et 3, mêmes éditeurs

$m(A)$ est appelée masse élémentaire de croyance généralisée en A . Chaque sous-ensemble $A \subseteq \Theta$ tel que $m(A) > 0$ est appelé élément focal de m . La masse $m(A)$ représente le degré de croyance attribué à la proposition A et qui n'a pas pu, étant donné les connaissances disponibles être affectée à un sous-ensemble plus spécifique que A (Vannoorenberghe, 2003). L'ignorance complète par rapport à un ensemble d'hypothèses correspond à $m(\Theta) = 1$. Dans une hypothèse de "monde clos" ou Θ contient toutes les solutions du problème on a $m(\emptyset) = 0$. Une connaissance précise et sûre correspond à l'attribution de la masse unité à un singleton θ_i de Θ . $m(\theta_i)$ est alors appelée masse certaine. Quand elle n'est définie que sur des singletons, la structure de croyance (ou masse généralisée de croyance) est une distribution de probabilité. Une connaissance imprécise et sûre correspond à l'allocation de la masse unité à un élément focal non singleton. Une connaissance incertaine correspond à l'attribution de fractions de la masse à plusieurs éléments focaux (Masson, 2005). Si on considère deux éléments $A, B \in 2^\Theta$, $m(A) = 0$ et $m(B) = 0$ n'impliquent pas $m(A \cup B) = 0$.

Deux fonctions sont définies pour mesurer la croyance totale délivrée par une source d'évidence : la crédibilité¹⁵ (Bel) et la plausibilité¹⁶ (Pl) :

- la croyance totale délivrée par une source d'évidence relativement à une proposition $A \in 2^\Theta$ est définie par la fonction de crédibilité $Bel(.) : 2^\Theta \rightarrow [0, 1]$ associée au jeu de masse $m(.)$ telle que

$$Bel(A) = \sum_{\substack{A, B \in 2^\Theta \\ B \subseteq A}} m(B)$$

- la croyance totale délivrée par une source d'évidence relativement à une proposition $A \in 2^\Theta$ (A^c son complément dans 2^Θ) et pouvant (potentiellement) être transférée sur A est définie par la fonction de plausibilité $Pl(.) : 2^\Theta \rightarrow [0, 1]$ associée au jeu de masse $m(.)$ telle que

$$Pl(A) = 1 - Bel(A^c) = \sum_{\substack{A, B \in 2^\Theta \\ B \subseteq \Theta}} m(B) - \sum_{\substack{A, B \in 2^\Theta \\ B \subseteq A^c}} m(B) = \sum_{\substack{A, B \in 2^\Theta \\ B \cap A \neq \emptyset}} m(B)$$

Propriétés : les fonctions de crédibilité et de plausibilité sont telles que $\forall A, B \in 2^\Theta$

$$Bel(A) + Bel(B) \leq Bel(A \cup B) + Bel(A \cap B)$$

$$Pl(A) + Pl(B) \geq Pl(A \cup B) + Pl(A \cap B)$$

$$A \subseteq B \implies \begin{cases} Bel(A) \leq Bel(B) \\ Pl(A) \leq Pl(B) \end{cases}$$

Remarques :

- la crédibilité représente la masse de toutes les informations données par une source qui soutiennent l'hypothèse considérée. Les fonctions m et Bel représentent deux aspects de la même information. Elles peuvent être obtenues l'une à partir de l'autre à partir de calculs matriciels en utilisant la transformation de Möebius¹⁷ ;
- La plausibilité correspond à la masse de toutes les informations qui ne contredisent pas la proposition A ou à la masse qui pourrait être transférée sur A si les informations dont on dispose étaient moins incertaines ;

15. Belief en anglais

16. Plausibility en anglais

17. voir travaux de Ph. Smets cités dans (Dezert, 2003)

Soit un cadre de discernement Θ d'hypothèses exclusives et exhaustives et un jeu de masse $m(\cdot)$ fourni par une source d'évidence, la probabilité pignistique¹⁸ $BetP(\theta_i)$, relative à une hypothèse θ_i , est une mesure de probabilité subjective définie par $BetP : \Theta \rightarrow [0, 1]$

$$\forall \theta_i \in \Theta, P(\theta_i) = \sum_{B \subseteq \Theta | \theta_i \in B} \frac{1}{|B|} m(B) \text{ avec } |B| \text{ le cardinal de } B$$

On a la propriété suivante :

$$\forall A \subseteq \theta_i, Bel(A) \leq [P(A) = \sum_{\theta_i \in A} P\{\theta_i\}] \leq Pl(A)$$

La règle de fusion de *Dempster*

Soient $A, B, C \in 2^\Theta$ et deux sources \mathcal{B}_1 et \mathcal{B}_2 exprimant des masses de croyance $m_1(\cdot)$ et $m_2(\cdot)$ sur les éléments de 2^Θ . La masse de l'hypothèse C résultant de la fusion des jeux de masses $m_1(\cdot)$ et $m_2(\cdot)$ par application de la règle de Dempster est égale à :

$$\begin{aligned} m(C) \triangleq [m_1 \oplus m_2] &= \frac{\sum_{A \cap B = C} m_1(A) \cdot m_2(B)}{\sum_{A \cap B \neq \emptyset} m_1(A) \cdot m_2(B)} = \frac{\sum_{A \cap B = C} m_1(A) \cdot m_2(B)}{1 - \sum_{A \cap B = \emptyset} m_1(A) \cdot m_2(B)} \\ &= \frac{\sum_{A \cap B = C} m_1(A) \cdot m_2(B)}{1 - K} \end{aligned} \quad (5.1)$$

La règle de *Dempster* est donc une règle de consensus conjonctif normalisée par le conflit $K = \sum_{A \cap B = \emptyset} m_1(A) \cdot m_2(B)$. Un exemple de calcul avec trois sources est proposé en annexe F.3.1, p. 356.

Facteur d'affaiblissement d'une source

Soit une source \mathcal{B} décrite par une fonction de masse $m(\cdot)$ relativement au cadre de discernement Θ . Le facteur de fiabilité α_s ou facteur d'affaiblissement de $m(\cdot)$ est une valeur $\alpha_s \in [0, 1]$ telle que pour tout ensemble¹⁹ $A \subset 2^\Theta$, la fonction de masse affaiblie $m'(\cdot)$ soit définie par :

$$\begin{cases} m(A) \\ m(\Theta) \end{cases} \longrightarrow \begin{cases} m'(A) = \alpha_s \cdot m(A) \quad \forall A \neq \Theta \\ m'(\Theta) = (1 - \alpha_s) + \alpha_s \cdot m(\Theta) \end{cases} \quad (5.2)$$

Cas particuliers :

- $\alpha_s = 1$ correspond à une source \mathcal{B} totalement fiable ;
- $\alpha_s = 0$ correspond à une source \mathcal{B} totalement non fiable.

Éléments	θ_1	θ_2	$\theta_1 \cup \theta_2$
$m_{\mathcal{B}}(\cdot)$	0.6	0.2	0.2
$m'_{\mathcal{B}}(\cdot)$	0.3	0.1	0.6

TABLE 5.1 – Exemple d'affaiblissement d'une source \mathcal{B} - Facteur d'affaiblissement $\alpha_s = 0.5$ - $Card(\Theta) = 2$

18. du latin *pignus* : pari

19. ou $A \subset D^\Theta$ dans le cadre de la *DSmT*

La détermination des masses de croyance

La théorie des fonctions de croyance est un formalisme qui permet d'assouplir les exigences par rapport au cadre de la théorie des probabilités en tolérant une répartition de masses de croyance sur des ensembles d'éléments du cadre de discernement et sur l'ignorance. La détermination des fonctions de masses $m(\cdot)$ est une des premières difficultés d'application de la méthode (Martin, 2005). Elle permet la représentation d'une grandeur quantitative sous forme d'intervalles quelconques, translatés ou emboîtés (consonants) (Sentz and Ferson, 2002) en étant dans ce dernier cas équivalente à une distribution de possibilités (Dubois et Prade, 2006). Les jugements d'experts sont exploités pour définir les intervalles et les niveaux de confiance associés à chacun des intervalles. Dans les cas d'intervalles numériques consonants, la définition d'une distribution de possibilité permet ainsi d'exprimer indirectement des masses de croyance.

Dans le cas d'une information qualitative ou de classes numériques, une des difficultés reste cependant de déterminer les masses de croyance devant être affectées aux classes retenues.

Plusieurs méthodes ont été proposées pour déterminer des masses ou des probabilités subjectives de manière qualitative soit :

- à partir de représentation arborescente permettant d'encadrer progressivement une valeur numérique en partant de descripteurs linguistiques (faible, satisfaisant, très bon, excellent) (Bryson et al., 1994; Bryson and Mobolurin, 1999; Ngwenyama and Bryson, 1998, 1999) ;
- à partir d'une échelle d'évaluation verbale telle que proposée par *Saaty* (Beynon et al., 2000; Millet and Wedley, 2002; Yager, 2008; Monti and Carenini, 2000)²⁰ ;
- à partir de structures de préférences dérivées en masses de croyances (Wong et al., 1993; Wong and Lingras, 1994).

Des masses de croyance peuvent ensuite être attribuées pour qualifier la confiance sur ces évaluations subjectives (Yang and Fu, 2009)...

Décision dans le cadre de la théorie de l'évidence

Deux approches existent pour coupler un modèle de décision avec la théorie des fonctions de croyance (Parsons, 2001). On peut tout d'abord choisir d'interpréter les fonctions de croyances d'un point de vue probabiliste (limites hautes et basses de probabilités) en considérant d'une part que la crédibilité $Bel(A)$ est une borne inférieure de la probabilité de A et d'autre part que la plausibilité $Pl(A)$ est une borne supérieure de la probabilité de A . On peut aussi considérer les fonctions de croyance non plus comme des bornes hautes et basses de probabilités imprécises mais comme des moyens de représenter des croyances à un niveau *crédal*²¹ alors que les décisions sont prises à un niveau pignistique²² (Smets and Kennes, 1994).

La fusion des masses de croyance permet d'aboutir à une représentation de la vérité des informations disponibles en rapport avec des hypothèses pré-définies. Classiquement, on peut retenir plusieurs principes pour retenir une classe (Martin, 2008b). Il peut s'agir soit du :

- maximum de crédibilité (Bel) dans le cadre d'un choix pessimiste ;
- maximum de plausibilité (Pl) dans le cadre d'un choix optimiste ;
- maximum de probabilité pignistique ($BetP$) dans le cadre d'une approche moyenne ;

A noter qu'à partir de la probabilité pignistique, il est possible d'appliquer les outils classiques de la décision classique dans le contexte d'un risque "pignistique" en définissant des bornes de risque inférieure et supérieure (Vannoorenberghe, 2003; Lardon, 2004).

20. élicitation de probabilités subjectives

21. du latin *credo* : croire

22. du latin *pignus* : pari

Les évolutions de la théorie initiale

La théorie de *Dempster-Shafer* repose sur une hypothèse de monde clos où Θ représente l'événement certain et \emptyset l'événement impossible. Le modèle des croyances transférables (*TBM*) (Smets and Kennes, 1994) ²³ adopte une hypothèse de monde "ouvert" où \emptyset correspond à toutes les hypothèses manquantes dans le cadre de discernement constituant une classe de rejet notamment pour le conflit entre sources. La masse affectée à \emptyset peut donc être non nulle dans ce modèle. La règle de fusion de *Smets* est une règle de fusion conjonctive non normalisée attribuant le conflit à l'ensemble vide. La théorie de *Dezert-Smarandache* (*DSmT*) ou théorie du raisonnement plausible et paradoxal a été proposée pour dépasser les limitations de la théorie de *Dempster-Shafer* (*DST*). Elle concerne l'information incertaine, imprécise, vague et paradoxale provenant de sources d'information conflictuelles et comble certaines limitations de la théorie de *Dempster-Shafer*.

5.4.2 La théorie de *Dezert-Smarandache* (*DSmT*)

Les limites de la *DST*

La théorie de *Dempster-Shafer* (*DST*) repose sur un cadre de discernement exhaustif d'hypothèses exclusives, sur le principe du tiers-exclus (chaque élément de 2^Θ admet un complément) et sur la règle de fusion de *Dempster*. Ces trois fondements sont remis en cause par la théorie de *Dezert-Smarandache* (*DSmT*) qui permet contrairement à la *DST* de (Dezert and Smarandache, 2009) :

- de représenter des hypothèses vagues avec des limites floues entre elles sans raffiner le modèle de discernement ;
- de modéliser les problèmes conformément à la réalité en définissant des modèles hybrides autorisant des intersections partielles entre hypothèses ;
- de gérer le conflit à l'aide de règles de redistribution proportionnelle.

La théorie *DSmT* se distingue de manière fondamentale de la théorie *DST* au travers de la modélisation des hypothèses selon des modèles dits *libres* ou *hybrides* et des règles de fusion répartissant le conflit de manière proportionnelle. La théorie propose également des opérateurs qualitatifs et des approches de fusion de masses de croyances imprécises non exploitées dans ce travail.

Principes

L'hyper-powerset D^Θ de Θ se définit comme l'ensemble de toutes les propositions possibles des éléments de 2^Θ construites avec les opérateurs \cup et \cap telles que $\forall A, B \in D^\Theta, (A \cup B) \in D^\Theta$ et $(A \cap B) \in D^\Theta$ (voir l'exemple en FIG. 5.6).

Dans le cadre de la *DSmT*, les fonctions de crédibilité (*Bel*), de plausibilité (*Pl*) et la probabilité pignistique sont définies de la manière suivante dans le cadre de la *DSmT* :

- la crédibilité généralisée d'une proposition $A \in D^\Theta$ est définie par la fonction $Bel(.) : D^\Theta \rightarrow [0, 1]$ associée au jeu de masse $m(.)$ telle que

$$Bel(A) = \sum_{\substack{B \in D^\Theta \\ B \subseteq A}} m(B)$$

- la plausibilité généralisée d'une proposition $A \in D^\Theta$ est définie par la fonction $Pl(.) :$

23. Transferable Belief Model

$2^\Theta \rightarrow [0, 1]$ associée au jeu de masse $m(\cdot)$ telle que

$$Pl(A) = \sum_{\substack{B \in D^\Theta \\ B \cap A \neq \emptyset}} m(B)$$

- la probabilité pignistique $BetP(\theta_i)$, relative à une hypothèse θ_i , est une mesure de probabilité subjective définie par $BetP : \Theta \rightarrow [0, 1]$

$$\forall \theta_i \in D^\Theta, P(\theta_i) = \sum_{C \in D^\Theta | \theta_i \cap C \neq \emptyset} \frac{|C \cap \theta_i|}{|C|} m(C) \text{ avec } |C| \text{ le cardinal de } C$$

La règle classique conjonctive notée $DSmC$ ou consensus conjonctif dans le cadre de la $DSmT$ se définit de la manière suivante. Soit un élément C de l'hyper-powerSet D^Θ , soit deux jeux de masses de croyance $m_1(\cdot)$ et $m_2(\cdot)$ associées aux deux sources β_1 et β_2 . La masse fusionnée est égale à :

$$m(C) \triangleq [m_1 \oplus m_2] = \sum_{\substack{A, B \in D^\Theta \\ A \cap B = C}} m_1(A) m_2(B)$$

Cette règle qui s'applique dans le cadre d'un modèle libre est commutative et associative.

Modèles libre et hybride

Plusieurs types de modèles peuvent être utilisés dans le cadre de la théorie $DSmT$. Le choix d'un modèle dépend de la représentation que l'on se fait de la réalité et des possibles intersections entre hypothèses. Les contraintes d'intégrité associées aux intersections entre hypothèses pouvant être soit vides, soit non vides définissent les différents modèles. Le modèle le plus contraint correspond à un modèle de *Shafer* ($\mathcal{M}^0(\theta)$). Le modèle hybride $\mathcal{M}(\theta)$ s'exprime sur D^Θ et définit des contraintes d'intégrité partielles entre les hypothèses. Le modèle libre $\mathcal{M}^f(\theta)$ s'exprime aussi sur D^Θ et ne correspond à aucune contraintes entre les hypothèses. Par exemple, plusieurs experts émettent un avis sur le type de phénomène torrentiel affectant un bassin versant. Il peut s'agir de charriage, de lave torrentielle de type boueuse ou granulaire avec des phénomènes mixtes. Un modèle hybride permet de représenter ces différentes hypothèses (FIG. 5.5).

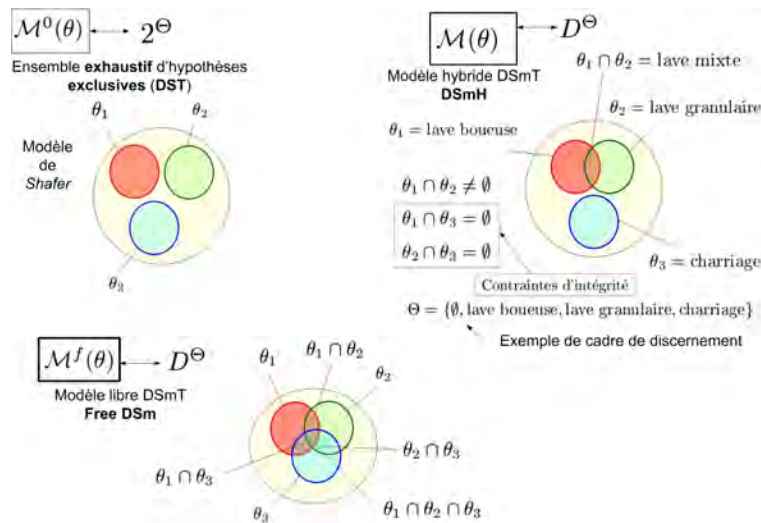


FIGURE 5.5 – Modèles de Shafer, hybride et libres dans le cadre de la DST et la $DSmT$

Soit un cadre de discernement $\Theta = \{\theta_1, \theta_2\}$ muni de deux hypothèses élémentaires θ_1 et θ_2 , on peut décrire les différences entre les théories de la manière suivante (Dezert, 2003)²⁴ :

- La théorie des probabilités manipule des jeux de probabilités $m(\cdot) \in [0, 1]$ tel que :

$$m(\theta_1) + m(\theta_2) = 1$$

- La théorie de *Dempster-Shafer* (*DST*) manipule des jeux de masses de crédibilité $m(\cdot) \in [0, 1]$ tels que :

$$m(\theta_1) + m(\theta_2) + \underbrace{m(\theta_1 \cup \theta_2)}_{\text{incertitude}} = 1$$

- La théorie de *Dezert-Smarandache* (*DSmT*) manipule des informations incertaines et paradoxales caractérisées par des jeux de masses $m(\cdot) \in [0, 1]$ tels que :

$$m(\theta_1) + m(\theta_2) + \underbrace{m(\theta_1 \cup \theta_2)}_{\text{incertitude}} + \underbrace{m(\theta_1 \cap \theta_2)}_{\text{paradoxe}} = 1$$

Exemple de fusion comparée dans le cadre de la *DST* et de la *DSmT*

On envisage un cadre de discernement $\Theta = \{\theta_1, \theta_2\}$ représentés dans un modèle de *Shafer* et un modèle libre *Dsm* (*freeDSm*)(FIG. 5.6). Dans le modèle de Shafer, les hypothèses sont réputées exclusives ($\theta_1 \cap \theta_2 = \emptyset$). Le power-set correspond à $2^\Theta = \{\emptyset, \theta_1, \theta_2, \theta_1 \cup \theta_2\}$.

Dans le modèle libre, l'hyper-powerset correspond à $D^\Theta = \{\emptyset, \theta_1, \theta_2, \theta_1 \cup \theta_2, \theta_1 \cap \theta_2\}$. L'intersection $\theta_1 \cap \theta_2$ peut être non vide.

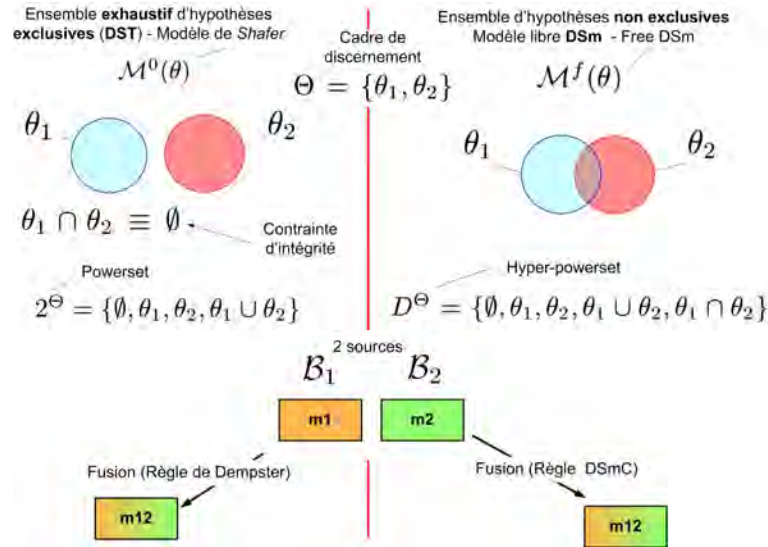


FIGURE 5.6 – Deux modélisations du problème dans le cadre de la *DST* ou de la *DSmT*

Nous décrivons ici la fusion de jeux de masse de croyance m_1 et m_2 exprimés par deux sources \mathcal{B}_1 et \mathcal{B}_2 (TAB. 5.2).

Éléments	θ_1	θ_2	$\theta_1 \cup \theta_2$
m_1	0.2	0.7	0.1
m_2	0.4	0.3	0.3

TABLE 5.2 – Tableau masses de croyances - $\text{Card}(\Theta) = 2$

24. p.30

Modèle de *Shafer* Les deux sources m_1 et m_2 sont fusionnées de manière conjonctive.

$$m_{12}(\theta_1) = m_1(\theta_1).m_2(\theta_1) + m_1(\theta_1).m_2(\theta_1 \cup \theta_2) + m_2(\theta_1).m_1(\theta_1 \cup \theta_2)$$

$$m_{12}(\theta_1) = 0.2 \cdot 0.4 + 0.2 \cdot 0.3 + 0.4 \cdot 0.1 = 0.18$$

$$m_{12}(\theta_2) = m_1(\theta_2).m_2(\theta_2) + m_1(\theta_2).m_2(\theta_1 \cup \theta_2) + m_2(\theta_2).m_1(\theta_1 \cup \theta_2)$$

$$m_{12}(\theta_2) = 0.7 \cdot 0.3 + 0.7 \cdot 0.3 + 0.3 \cdot 0.1 = 0.45$$

$$m_{12}(\theta_1 \cup \theta_2) = m_1(\theta_1 \cup \theta_2).m_2(\theta_1 \cup \theta_2)$$

$$m_{12}(\theta_1 \cup \theta_2) = 0.1 \cdot 0.3 = 0.03$$

$$m_{12}(\theta_1 \cap \theta_2) = m_1(\theta_1).m_2(\theta_2) + m_1(\theta_2).m_2(\theta_1)$$

$$m_{12}(\theta_1 \cap \theta_2) = 0.2 \cdot 0.3 + 0.4 \cdot 0.7 = 0.34$$

$m_{12}(\theta_1 \cap \theta_2 \equiv \emptyset)$ représente le conflit total (K) utilisé pour la normalisation des masses (TAB. 5.3).

.

Eléments	θ_1	θ_2	$\theta_1 \cup \theta_2$
m_{12}	0.272	0.682	0.046

TABLE 5.3 – Résultat de la fusion - Règle de Dempster - modèle de *Shafer*

Modèle libre *Dsm* La fusion est effectuée en utilisant la règle du consensus conjonctif mis en œuvre sur D^Θ .

$$m_{12}(\theta_1 \cap \theta_2) = m_1(\theta_1).m_2(\theta_2) + m_1(\theta_2).m_2(\theta_1)$$

$$m_{12}(\theta_1 \cap \theta_2) = 0.2 \cdot 0.3 + 0.4 \cdot 0.7 = 0.34$$

Eléments	θ_1	θ_2	$\theta_1 \cap \theta_2$	$\theta_1 \cup \theta_2$
m_{12}	0.18	0.45	0.34	0.03

TABLE 5.4 – Résultat de la fusion - Règle *DSmC* - modèle libre *DSm*

5.5 Fusion d'information et conflit

Les problématiques associées à la définition d'un problème de fusion concernent le contexte, les sources, les preuves et les opérations de fusion (Sentz and Ferson, 2002). Nous rajoutons à cette liste le choix de modélisation du problème de fusion et donc de la théorie associée (modèle de *Shafer*, modèle libre *DSm* ou modèle hybride) (FIG. 5.7).

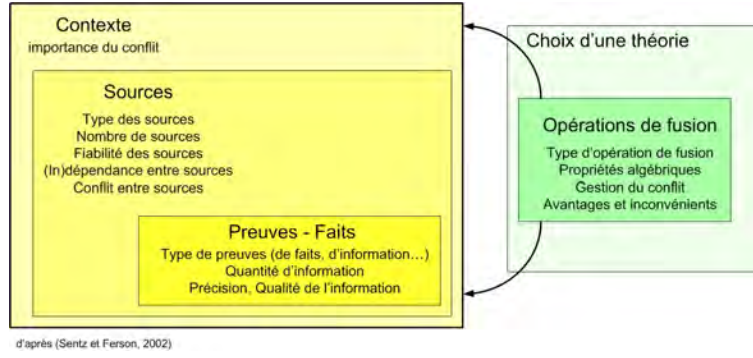


FIGURE 5.7 – Principales difficultés liées à la fusion d'information

5.5.1 Notion de conflit

La gestion du conflit est un des problèmes essentiels de la fusion d'information. Une définition qualitative du conflit entre deux masses de croyance a été proposée par (Liu, 2006) : *Un conflit entre deux sources d'évidence dans la théorie de Dempster-Shafer peut être interprété qualitativement comme le fait qu'une source appuie fortement une hypothèse et que l'autre en appuie fortement une autre, les deux hypothèses n'étant pas compatibles*. La compatibilité des hypothèses est une donnée du modèle. Dans un modèle de Shafer (*DST*), les hypothèses sont obligatoirement exclusives les unes des autres. Des masses de croyance attribuées à deux hypothèses différentes génèrent obligatoirement un conflit. En cas de fort conflit, associée à une faible valeur de re-normalisation dans le cadre de la règle de *Dempster*, les sources sont dites peu cohérentes (Dubois et Prade, 2006).

La mesure du conflit peut également être utilisée pour valider et orienter le choix d'une méthodologie de fusion comprenant le choix de la règle de fusion et l'ordre de fusion. Dans ce contexte, on peut par exemple, comparer les résultats d'un processus d'aide à la décision avec le choix réellement réalisé et choisir la méthodologie de fusion qui minimise le conflit entre la prédiction par un modèle et la réalité (Ayoun and Smets, 2001; Dezert, 2003).

Dans le cadre de la *DSmT*²⁵, on peut définir le conflit total (exemple pour 2 sources) par :

$$k_{12_T} = \sum_{\substack{\theta_1, \theta_2 \in D^\Theta \\ \theta_1 \cap \theta_2 = \emptyset}} m_1(\theta_1) \cdot m_2(\theta_2) = \sum k_{12_P}$$

Le conflit total est la somme des conflits partiels définis par :

$$k_{12_P} = \sum_{\substack{\theta_1, \theta_2 \in D^\Theta \\ \theta_1 \cap \theta_2 = \emptyset}} m(\theta_1 \cap \theta_2)$$

5.5.2 Règles de fusion pour gérer le conflit

Beaucoup d'applications utilisent la règle de *Dempster* pour fusionner les sources. Cette règle (EQ. 5.1) conduit à des résultats contre-intuitifs dans les situations de fort conflit. Cette observation a fait l'objet d'un grand nombre de travaux produisant autant de contre-exemples dans lesquels les résultats obtenus sont tous contre-intuitifs (Zadeh, 1986; Murphy, 2000)²⁶.

Il existe une infinité de règles basées sur le consensus conjonctif et sur le transfert de masses en conflit. Une approche générique permet de retrouver la plupart des règles décrites dans la

25. remplacer D^Θ par 2^Θ dans le cadre d'un modèle de *Shafer*

26. voir le célèbre exemple de Lofti Zadeh en annexe F.3.1, p. 355

littérature (Lefevre et al., 2002, 2003). Il n'existe pas de règle qui satisfasse tout le monde et s'adapte à toutes les problématiques (Dezert and Smarandache, 2006). Cette abondance de règles de fusion peut être jugée inutile en compliquant l'implémentation de la théorie des fonctions de croyance (Haenni, 2002). La mise en œuvre de ces théories n'est jamais directe mais des développements très récents ont proposé des cadres de calcul accessibles et performants pour effectuer les calculs dans le cadre de la *DSmT* (Djiknavorian and Grenier, 2006; Martin, 2009)²⁷. L'analyse des règles de fusion repose sur leurs propriétés de neutralité, commutativité, associativité, idempotence²⁸. L'adéquation d'une règle de fusion à un problème donné reste cependant encore un sujet de recherche ouvert.

D'autres règles de fusion ont été proposées comme alternatives à la règle de *Dempster*. Elles ont fait l'objet de nombreuses analyses comparatives (voir par exemple (Dezert and Smarandache, 2004) (Sentz and Ferson, 2002)). Leurs différences proviennent du mode de gestion du conflit avec des justifications parfois discutables (Dezert and Smarandache, 2006)²⁹ :

- la règle de *Dempster* (règle de référence) transfère le conflit sur les éléments focaux proportionnellement aux masses fusionnées suivie d'une normalisation ;
- la règle de *Smets* transfère le conflit sur l'ensemble vide en considérant que cet ensemble vide contient les hypothèses inconnues. Le conflit est interprété comme une mauvaise définition du cadre de discernement ;
- la règle de *Yager* (Yager, 1987) transfère le conflit sur l'ignorance totale supposant que le cadre de discernement est valide mais que les sources ne sont pas fiables ;
- la règle de *Dubois-Prade* (Dubois and Prade, 1998)³⁰ et la règle *DSm hybride* transfèrent les masses conflictuelles sur les ignorances totales et partielles en considérant qu'entre deux hypothèses conflictuelles une est bonne. Les sources sont combinées conjonctivement (intersection) quand elles ne sont pas en conflit (intersection non vide des éléments focaux) et disjonctivement (union) autrement.
- les règles *PCR* de redistribution proportionnelle du conflit sont basées sur les conflit totaux et partiels transférés sur les éléments focaux à l'aide de coefficients de pondération dépendant de leurs masses initiales.

De manière très convaincante et pédagogique, les règles associées à la *DSmT* et notamment les règles de redistribution proportionnelle du conflit (*PCR*)³¹ sont, elles aussi, comparées avec les règles existantes et démontrent de nombreux avantages pour gérer le conflit (Dezert and Smarandache, 2006, 2009). La règle *PCR6* (Martin and Osswald, 2006) est la dernière évolution de ces règles avec de bons résultats pour la décision (Osswald and Martin, 2006). Ces règles ont par contre un inconvénient : elles ne sont pour la plupart pas associatives contrairement à la règle de *Dempster*. Ceci signifie que l'ordre de fusion des sources n'est pas indifférent. Par contre, elles disposent des propriétés de cohérence des résultats, de commutativité et de neutralité jugées essentielles par leurs auteurs.

5.6 Synthèse : L'intérêt d'une approche complémentaire associant les différentes théories de l'incertain

Finalement, les différents formalismes doivent être considérés comme complémentaires les uns des autres (Parsons, 2001). La théorie des probabilités, avec son statut indiscutable de théorie la plus ancienne, étudiée et aboutie pour manipuler l'incertitude, montre ses limites dans les cas malheureusement fréquents d'imperfection et de subjectivité de l'information. L'expertise des

27. Les travaux d'Arnaud Martin sont utilisés dans le cadre de notre application

28. voir définitions en annexe F.3.2, p. 357

29. p.63

30. voir annexe F.3.2, p. 358

31. voir les formulations de quelques règles en annexe F.3.2, p. 358

5.6. SYNTHÈSE : L'INTÉRÊT D'UNE APPROCHE COMPLÉMENTAIRE ASSOCIANT LES DIFFÉRENTES THÉORIES DE L'INCERTAIN

risques naturels gravitaires regroupe toutes les formes d'imperfection de l'information. L'analyse comparée des formalismes de l'incertain donne lieu à une importante littérature concernant d'une part la comparaison de la théorie des probabilités avec les "nouvelles théories" de l'incertain (possibilités, fonctions de croyance) (Dubois et al., 2000) et aussi de ces théories entre elles, possibilités et fonctions de croyances, théories de *Dempster-Shafer* et de *Dezert-Smarandache*. La théorie des fonctions de croyance peut ainsi être présentée comme une généralisation des théories des probabilités et des possibilités (FIG. 5.8). Son développement est assez récent. En effet, les liens complexes avec la théorie des probabilités et la difficulté de définition d'une fonction de croyance n'ont pas aidé à faire connaître le cadre théorique des fonctions de croyance (Vannoorenberghe, 2003).

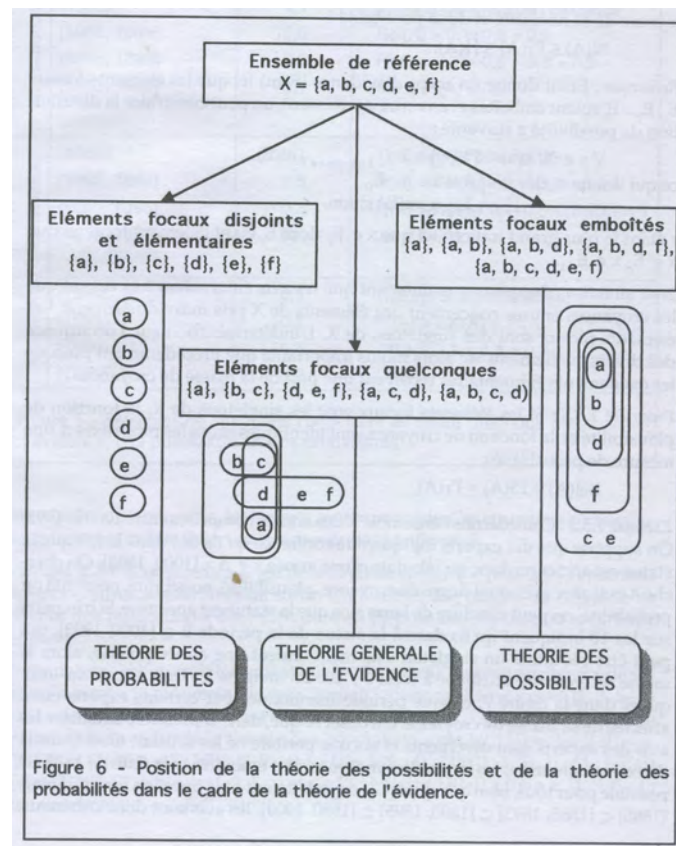


FIGURE 5.8 – Positionnement des théories des probabilités, possibilités et fonctions de croyance - source (Bouchon-Meunier, 1995), p. 89

Le choix des théories de l'incertain pour les risques naturels

Peu d'applications de la théorie des fonctions de croyance concernent le domaine de l'environnement en général et encore moins le domaine des risques naturels. Une revue bibliographique étendue des applications de la théorie des fonctions de croyance peut être trouvée dans (Sentz and Ferson, 2002). Les domaines d'application classiques de cette théorie concernent essentiellement l'imagerie radar et sonar, la télédétection, la classification et la reconnaissance d'images ou de formes, l'analyse de la mobilité urbaine, la robotique et aussi le génie civil (?). Dans le domaine de l'aide à la décision appliquée à la mobilité urbaine et au transport, des nombres flous sont utilisés pour établir un lien avec les masses d'éléments d'un cadre de discernement défini dans le contexte de la théorie de *Dempster-Shafer* (Omrani et al., 2007). Quelques applications en matière d'environnement concernent par exemple la reconnaissance de sols au travers de la

télé-détection (Corgne, 2004), l'estimation de la charge critique des sols et des cours d'eau vis à vis du taux d'acidité et d'eutrophisation (Wadsworth and Hall, 2007), l'évaluation intégrée de la dégradation des sols (Thiam, 2005). Dans le domaine des risques naturels, parmi les rares applications, on peut citer l'analyse de la stabilité des pentes au travers d'une étude comparée entre une approche basée sur le facteur de certitude et une approche associant flou et théorie des fonctions de croyance (Binaghi et al., 1998).

Pour déterminer les composantes du risque dans le contexte des phénomènes naturels en montagne, une expertise multi-disciplinaire caractérise et manipule parfois de manière contradictoire une information imparfaite (imprécise, incertaine, incomplète) exprimée sous des formes quantitative et qualitative.

Dans ce cadre, la théorie des sous-ensembles flous permet d'établir des correspondances entre des estimations vagues sous forme linguistique et des valeurs numériques, proposant déjà ici un mode de capitalisation du savoir-faire de l'expert dans la définition des bornes. La théorie des possibilités étend cette approche et permet à la fois de prendre en compte l'imprécision et de mesurer un degré de certitude associé à l'évaluation de l'information. Pour des valeurs numériques et continues, la définition de distributions de possibilités correspond à une démarche réaliste et compatible avec les analyses réalisées en pratique par des experts.

La théorie des fonctions de croyance permet la prise en compte d'informations hétérogènes (numériques ou symboliques), imparfaites (imprécises, incertaines et incomplètes) exprimées par des sources qu'il faut agréger, combiner, fusionner. La fusion d'information permet d'accéder à une information plus fiable et donc d'améliorer la prise de décision (Vannoorenberghe, 2003).

La théorie de *Dempster-Shafer* (ou théorie de l'évidence, ou des fonctions de croyance) exprime des limites pour représenter concepts flous, vagues et gérer convenablement les situations de fort conflit entre les sources. La théorie de *Dezert-Smarandache* ou théorie du raisonnement plausible et paradoxal propose à la fois un cadre polyvalent de modélisation tolérant le flou et l'incertitude et des règles de fusion performantes en situations de conflit ³².

Le cadre de décision n'est pas multicritères

Les théories des ensembles flous, des possibilités et des fonctions de croyance offrent un ensemble polyvalent pour représenter et traiter l'information imparfaite. Par contre, elles ne répondent pas complètement à l'objectif d'aide à la décision dans un contexte multicritères (FIG. 5.9).

32. voir la méthodologie complète en annexe F.3, FIG. F.4)

5.6. SYNTHÈSE : L'INTÉRÊT D'UNE APPROCHE COMPLÉMENTAIRE ASSOCIANT LES DIFFÉRENTES THÉORIES DE L'INCERTAIN

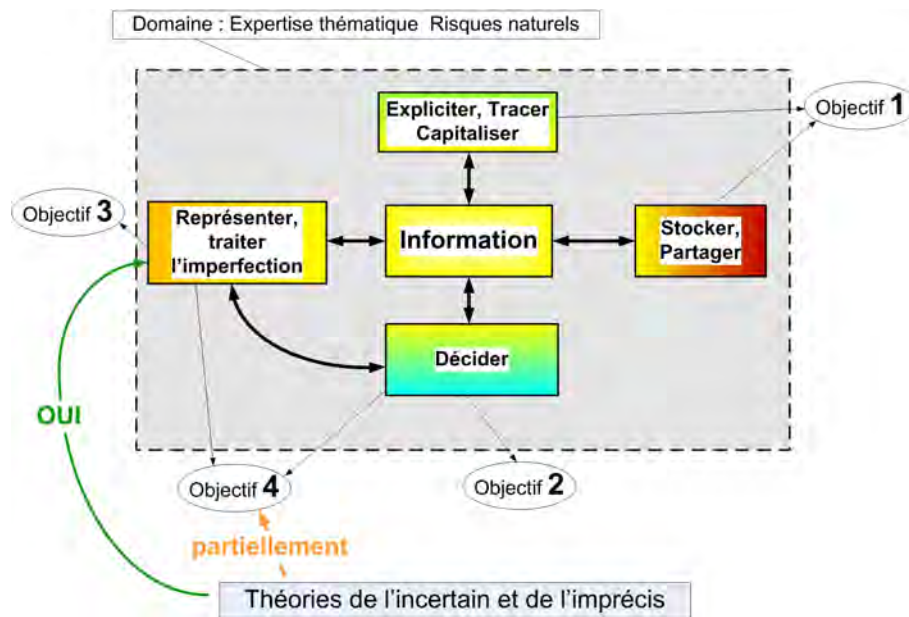


FIGURE 5.9 – Contributions des "nouvelles " théories formelles de l'incertain et de l'imprécis aux objectifs de la thèse

La fusion d'information, associée à la théorie des fonctions de croyance, offre un cadre de décision fondé sur un degré de "vérité" associé aux éléments du cadre de discernement : la décision consiste à retenir un élément selon des principes pessimistes, optimistes ou de compromis basés sur des valeurs de masses de croyance, de maximum de crédibilité, plausibilité ou probabilité pignistique obtenus à partir de sources plus ou moins fiables et conflictuelles. Ceci constitue un avantage par rapport aux approches multicritères qui reposent sur une notion de compromis et ne permettent pas de combiner de manière explicite des avis différents sur l'évaluation de critères.

D'un point de vue méthodologique, la fusion d'information impose par contre, la définition d'un cadre de discernement commun à toutes les sources d'information. Cette exigence ne la rend donc pas directement applicable dans le cadre d'une décision multicritères. En l'état, on ne peut donc pas bénéficier simultanément des atouts et avantages de la fusion d'information et des approches multicritères. Il existe cependant des tentatives pour associer ces approches. Le chapitre suivant (chapitre n°6) analyse tout d'abord les méthodes existantes permettant de confronter les méthodes de représentation de l'information imparfaite avec les méthodes d'aide multicritères à la décision (vues au chapitre n°4) avant de proposer une nouvelle méthodologie.

Chapitre 6

Synthèse : vers une nouvelle méthodologie pour la décision et l'expertise

Introduction

Les méthodes et théories d'aide à la décision, de représentation et de traitement de l'information (présentées dans les chapitres 4 et 5) apportent isolément des réponses partielles à l'objectif de recherche visant à associer décision et information imparfaite :

- Les méthodes d'aide multicritères à la décision permettent de décrire un processus de décision en agrégeant des évaluations de critères hétérogènes sur lesquels le décideur exprime ses préférences ou une importance relative. Dans leurs versions originales, elles ne permettent pas de prendre en compte des évaluations imparfaites et multiples des critères ;
- Les théories formelles de l'incertain représentent l'information vague, imprécise, incertaine et permettent la combinaison des niveaux de vérité associés aux informations provenant de sources hétérogènes de fiabilité variables et potentiellement conflictuelles. Les théories des fonctions de croyance et des possibilités ne peuvent fusionner que des informations de même nature provenant de sources différentes et pas des critères hétérogènes.

Un de nos objectifs concerne le développement d'une méthode d'aide à la décision pouvant prendre en compte l'imperfection de l'information et des sources multiples plus ou moins fiables et conflictuelles¹. L'association des méthodes multicritères et des théories de traitement et de représentation de l'information imparfaite est donc envisagée. Cette introduction de l'imperfection de l'information dans les approches multicritères n'est pas une problématique nouvelle et il existe par exemple des outils et méthodes qui utilisent notamment les théories des ensembles flous et des fonctions de croyance pour considérer des évaluations imprécises ou incomplètes des alternatives, des préférences floues entre critères ...

1. voir section 2.5.2, p. 64

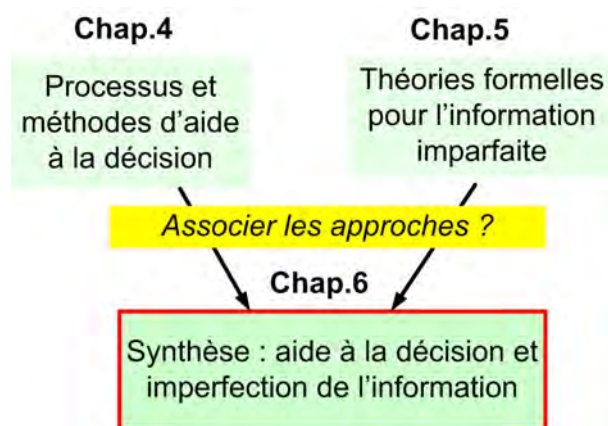


FIGURE 6.1 – Positionnement du chapitre n°6 : Vers une méthodologie associant l'aide multicritères à la décision et les théories de l'information imparfaite

Exploitant les méthodes présentées précédemment (FIG. 6.1), ce court chapitre de synthèse examine comment les deux types d'approches ont été associés dans la littérature au travers de l'introduction d'approches floues ou basées sur la théorie des fonctions de croyance dans les méthodes d'agrégation totale. Il aboutit à la définition des principes d'une méthodologie améliorant les démarches existantes en associant l'analyse multicritères hiérarchique (*AHP*) et la fusion d'information qui fera l'objet du développement réalisé dans le chapitre n°8.

6.1 Aide multicritères à la décision et information imparfaite

L'incertitude peut être interne et liée à la structure du modèle de préférences et aux évaluations qu'il requiert. Elle peut aussi être externe et se référer à une méconnaissance des conséquences d'une action, ce cas correspondant alors à une situation de décision dans le risque ou l'incertain. Notre problématique est centrée sur l'incertitude interne et le lien entre l'imperfection de l'évaluation et la décision. Elle n'envisage que le cadre de la décision en univers certain. Cette section analyse comment l'imperfection de l'information a déjà été considérée dans le cadre des approches multicritères.

6.1.1 Analyse de sensibilité

L'incertitude et l'imprécision ont été considérées très tôt dans le cadre de l'aide multicritères à la décision (Roy, 1989; Bouyssou, 1989). A la base, les modèles d'aide multicritères sont basés sur l'évaluation déterministe des critères pour chaque action. Une première forme de prise en compte de l'incertitude consiste à effectuer des analyses de sensibilité sur l'évaluation des critères. Cette approche est justifiée quand la première cause de complexité de la décision résulte plus de la nature multicritères du problème que du caractère aléatoire ou incertain des conséquences de chaque action (Stewart, 2005b). Pour considérer l'information imparfaite dans le cadre des méthodes d'aide multicritères basées sur un critère de synthèse, il est possible d'introduire l'imperfection au niveau des évaluations sous forme de probabilités en appliquant des méthodes d'analyse de sensibilité classiques au modèle d'agrégation (Saltelli et al., 2004; Saltelli and Saisana, 2006). Une autre alternative consiste à utiliser des approches basées sur des intervalles ou des nombres flous.

Les méthodes issues de l'intelligence artificielle, parfois dénommées "nouvelles théories de l'incertain", constituent alors une alternative qualitative aux probabilités quand on ne peut pas construire des fonctions d'utilité ou que la représentation des préférences et de l'incertitude est

6.1. AIDE MULTICRITÈRES À LA DÉCISION ET INFORMATION IMPARFAITE

approximative (par choix ou impossibilité de faire mieux)(Bouyssou et al., 2006). Une approche possibiliste (qualitative) de l'incertitude dans le jugement apparaît cependant plus en accord avec le comportement humain qu'une approche probabiliste (Raufaste and Hilton, 2006).

6.1.2 Intervalles et nombres flous

L'incertitude concerne ici l'évaluation des préférences et des alternatives au niveau de chaque critère. On se place ici dans le contexte d'une évaluation déterministe des critères pour chaque action. Ceci correspond au contexte d'une décision en univers certain telle qu'abordée dans notre problématique.

L'évaluation floue d'alternatives est courante (Salo and Hamalainen, 1995; Salo, 1996)(Kuo et al., 2006)(Pan, 2008)(Chang et al., 2009). La logique floue est introduite dans le cadre des méthodes d'agrégation totale comme la théorie de l'utilité multi-attribut (*MAUT*) pour prendre en compte l'information incomplète à travers de ratios de préférences flous (Salo and Haimailainen, 2001) ou d'intervalles de jugements dans le cadre des méthodes *SMART* (Mustajoki et al., 2005) ou *AHP* (Entani et al., 2006). Des nombres flous sont utilisés pour représenter des profils de risque et de confiance de décideurs et atténuer les évaluations dans le cadre d'une nouvelle approche multicritères (Fenton and Wang, 2006). Ces approches reposent par contre souvent plus sur la prise en compte de l'imprécision que sur une incertitude d'évaluation.

Pour prendre en compte l'incertitude des jugements humains, des intervalles d'erreurs ont été appliqués aux évaluations utilisées dans l'analyse multicritères hiérarchique (*AHP*) (Sajjad Zahir, 1991). Thomas Saaty² a lui-même étudié la prise en compte de l'incertitude dans l'*AHP* (Saaty and Vargas, 1987) et plus récemment invalidé une approche floue des jugements numériques d'évaluation des alternatives : les valeurs numériques utilisées dans les comparaisons par paires intègrent et correspondent déjà à une évaluation floue par le décideur rendant inutile l'ajout de nouvelles formes de flou (Saaty and Tran, 2007).

6.1.3 Méthodes indirectes de prise en compte de l'incertitude

Incertitude structurelle dans les approches hiérarchiques Introduire un critère représentant l'ensemble des éléments inconnus susceptibles d'affecter le processus de décision est une manière très simple pour prendre en compte l'incertitude un modèle hiérarchique (Millet and Wedley, 2002; Ozdemir and Saaty, 2006). Cette approche initialement développée dans un contexte de décision en univers risqué, peut être utilisée dans le cadre d'une décision en univers certain, en permettant de comparer différents scénarios. La prise en compte de scénarios intégrant des niveaux d'aggravation du phénomène est une idée intéressante, par exemple dans le contexte de l'évaluation de l'exposition au risque d'avalanches en fonction de la contribution de chaque critère.

Dissocier la caractérisation de l'incertitude et la décision Une méthodologie récente traite le problème de décision en univers risqué comme un problème multicritères en deux étapes (Matos, 2007). La première étape consiste à évaluer l'incertitude associée aux alternatives en utilisant soit les probabilités, soit la théorie des ensembles flous, soit une description par scénarios. La seconde étape utilise l'analyse multicritères pour interpréter les résultats en distinguant le caractère optimiste et pessimiste de l'évaluation : *"la transformation d'un problème de décision sous incertitude dans un problème déterministe multicritères fournit plus d'information significative aux décideurs"*.

2. mathématicien, créateur de la méthode *AHP*

6.2 Théorie des fonctions de croyance et aide multicritères à la décision

Cette section aborde plus spécifiquement le cas de l'utilisation de la théorie des fonctions de croyance en lien avec les méthodes d'aide multicritères à la décision.

6.2.1 Fonctions de croyance et méthodes d'agrégation totale

La théorie des fonctions de croyance est utilisée dans un contexte de décision multicritères (méthodes d'agrégation totale) pour :

- évaluer globalement des groupes d'alternatives (Beynon et al., 2000) ;
- prendre en compte des sources d'évaluation multiples (Beynon, 2005a) ;
- évaluer des groupes d'alternatives évaluées de manière incomplète (sur certains critères seulement) (Hua et al., 2008) ;
- évaluer les alternatives de manière imprécise dans le cadre de la théorie *MAUT* (Wang et al., 1996; Yang and Singh, 1994; Yang and Sen, 1994; Yang, 2001; Yang and Xu, 2002; Yang et al., 2006; Wang et al., 2006a,b; Guo et al., 2007)

Dans le cadre de la théorie *MAUT*

Les approches développées autour de la théorie *MAUT* proposent des algorithmes complexes pour évaluer plusieurs alternatives simultanément. La présentation la plus claire nous semble être celle de (Wang et al., 2006a). En majorité, les problématiques correspondent à des contextes de décision dans l'incertain et les formes d'agrégation utilisées s'apparentent aux modèles d'utilité espérée dans lesquelles les probabilités sont remplacées par des fonctions de croyance. Dans tous les cas, les références à la théorie des fonctions de croyance ne sont pas des plus explicites (cadre de discernement, masses fusionnées, règle de fusion particulière ...) et la prise en compte des pondérations se fait à différents endroits des algorithmes. Les notions de conflit sont totalement ignorées dans toutes ces approches.

Dans le cadre de l'Analyse multicritères hiérarchique (*AHP*)

Deux autres approches concernent quant à elles l'utilisation conjointe de l'analyse multicritères hiérarchique (*AHP*) et la théorie de *Dempster-Shafer*. Nous étudions plus en détail ces approches qui correspondent

La première approche correspond à la prise en compte d'évaluations partielles d'alternatives (Hua et al., 2008). La théorie des fonctions de croyance est utilisée pour remplacer l'évaluation d'une alternative a_i relativement à un critère j par un intervalle $[Bel(a_{ij}), Pl(a_{ij})]$ (crédibilité, plausibilité). Le choix entre critères étant ensuite fait sur la base de règles de seuils permettant un classement entre les alternatives.

La seconde approche (Beynon et al., 2000) est conçue à la base dans le cadre du modèle d'évaluation original de l'*AHP* (*critère-solution*) visant à comparer des alternatives par paires. Elle vise normalement à éviter un trop grand nombre de comparaisons en regroupant des critères entre eux. Ce principe peut se défendre à condition, à notre avis, de l'interpréter plutôt comme une incertitude entre deux alternatives. Si on veut évaluer plusieurs alternatives dans lesquelles on a entièrement confiance, les placer dans un sous-ensemble revient à dire qu'on est incertain entre ces alternatives, ce qui n'est pas l'objectif recherché. Le cadre de discernement correspond ici aux alternatives et les éléments focaux sont des ensembles d'alternatives.

6.2. THÉORIE DES FONCTIONS DE CROYANCE ET AIDE MULTICRITÈRES À LA DÉCISION

Ces éléments focaux sont ensuite comparés dans le cadre d'une matrice de préférences (utilisant l'échelle de *Saaty*) non pas en terme d'importance mais en fonction " *d'une mesure du caractère favorable de la connaissance en faveur de l'élément considéré par rapport à Θ représentant l'ignorance totale* ". Les éléments sont ne sont comparés qu'avec Θ produisant des matrices de préférences creuses remplies de 0 et de 1 sauf sur les dernières lignes et colonnes³. A partir de cette matrice de préférences, on calcule des poids qui sont assimilés à des masses affectées à chacun des éléments focaux. On obtient donc pour chaque critère, des masses attribuées aux éléments focaux et intégrant la pondération. Les critères sont considérés comme des sources et les masses sont ensuite fusionnées classiquement en utilisant la règle de *Dempster*. La décision est ensuite prise sur la base des valeurs de crédibilité et de plausibilité en utilisant deux seuils : pour une hypothèse A , si $[Bel(A), Pl(A)] \subset [0.3, 1]$ alors il existe des preuves en faveur de A , si si $[Bel(A), Pl(A)] \subset [0.15, 0.75]$ alors il existe autant de preuves en faveur qu'en défaveur de A ⁴. Ce principe fait l'objet d'une analyse montrant que la structure des matrices de préférences utilisées est dépendante de l'échelle de préférences (nombre de classes) et, plus étonnant, que la masse affectée à l'ignorance ne peut être nulle. Elle tend en fait vers une limite inférieure qui ne peut pas être dépassée (Beynon, 2002). Un autre développement intéressant de cette approche, proposé dans (Beynon, 2005a) concerne le cadre de plusieurs sources d'évaluation et introduit l'utilisation de facteurs d'affaiblissement.

Conclusion sur l'utilisation de la théorie des fonctions de croyance Les modèles de décision envisagés dans les applications n'ont qu'un seul niveau hiérarchique. Par rapport à l'approche proposée par *Beynon* de type *critère-solution*, notre problématique concerne plutôt des modèles d'évaluation de type *critère-estimateur-solution* permettant d'évaluer des alternatives indépendamment les unes des autres. L'utilisation de la théorie des fonctions de croyance pour réaliser des évaluations groupées n'est pas retenue.

Nous retenons le principe d'utilisation de matrice de préférences pour déterminer des masses⁵. Des poids normalisés ont en effet les propriétés de masses de croyance (Yager, 2008).

Le principe d'assimilation d'un critère à une source est également retenu. Par contre, la détermination des masses nous semble contestable et mélange la confiance ou l'incertitude dans l'évaluation et l'importance dans la décision, ce qui n'est très explicite et souhaitable. Ainsi l'importance des critères se traduit par une pondération de matrices de préférences.

A ce titre, les approches proposées par *Beynon* et *Yang* sont jugées compliquées et peu claires. Elles introduisent les fonctions de croyance mais cette généralisation rend le modèle trop complexe et moins transparent vis à vis du décideur, compromettant l'utilisation pratique des résultats (Stewart, 2005b). L'association d'une méthode d'aide multicritères à la décision et d'une théorie permettant de prendre en compte l'imperfection de l'information reste donc perfectible.

6.2.2 Validité et limites d'une association entre fusion et approches multicritères

Les différences entre l'agrégation multicritères et la fusion

Les fonctions d'agrégation utilisées dans le cadre de l'aide multicritères à la décision servent à combiner et résumer plusieurs valeurs numériques en une seule. Les valeurs à agréger sont soit des préférences (exprimées entre des alternatives ou solutions), soit des degrés de satisfaction d'une alternative donnée par rapport aux critères considérés. Dans le domaine de l'aide à la

3. Les coefficients de cohérence ne sont pas fournis

4. d'après (Lucas and van der Gaag, 1991)

5. voir le principe d'évaluation qualitative des critères en 8.4.2, p. 204

CHAPITRE 6. SYNTHÈSE : VERS UNE NOUVELLE MÉTHODOLOGIE POUR LA DÉCISION ET L'EXPERTISE

décision face à l'incertain, les valeurs à agréger représentent les conséquences d'une alternative (Marichal, 2006).

L'utilisation des théories de l'incertain pour décider sur plusieurs critères pose le délicat problème de la différence entre l'agrégation et la fusion d'information (FIG. 6.2). A priori, les problématiques sont différentes. La fusion de préférences multicritères ou multi-agent cherche à établir un compromis entre des points de vue ou des agents, la fusion d'informations a pour but *"l'extraction de ce qui est vrai au milieu d'une collection de données souvent imprécises et contradictoires"* (Dubois et Prade, 2006). Dans le même temps, il existe des applications de choix multicritères qui comparent l'utilisation de la théorie des possibilités et du modèle des croyances transférables (Dubois et al., 2001) avec une référence explicite à une problématique d'agrégation. Dans le même esprit, *"le problème d'agrégation multicritères consiste à synthétiser des informations traduisant des aspects ou des points de vue différents et parfois conflictuels au sujet d'un même ensemble d'objets"* (Grabisch et Perny, 2003).

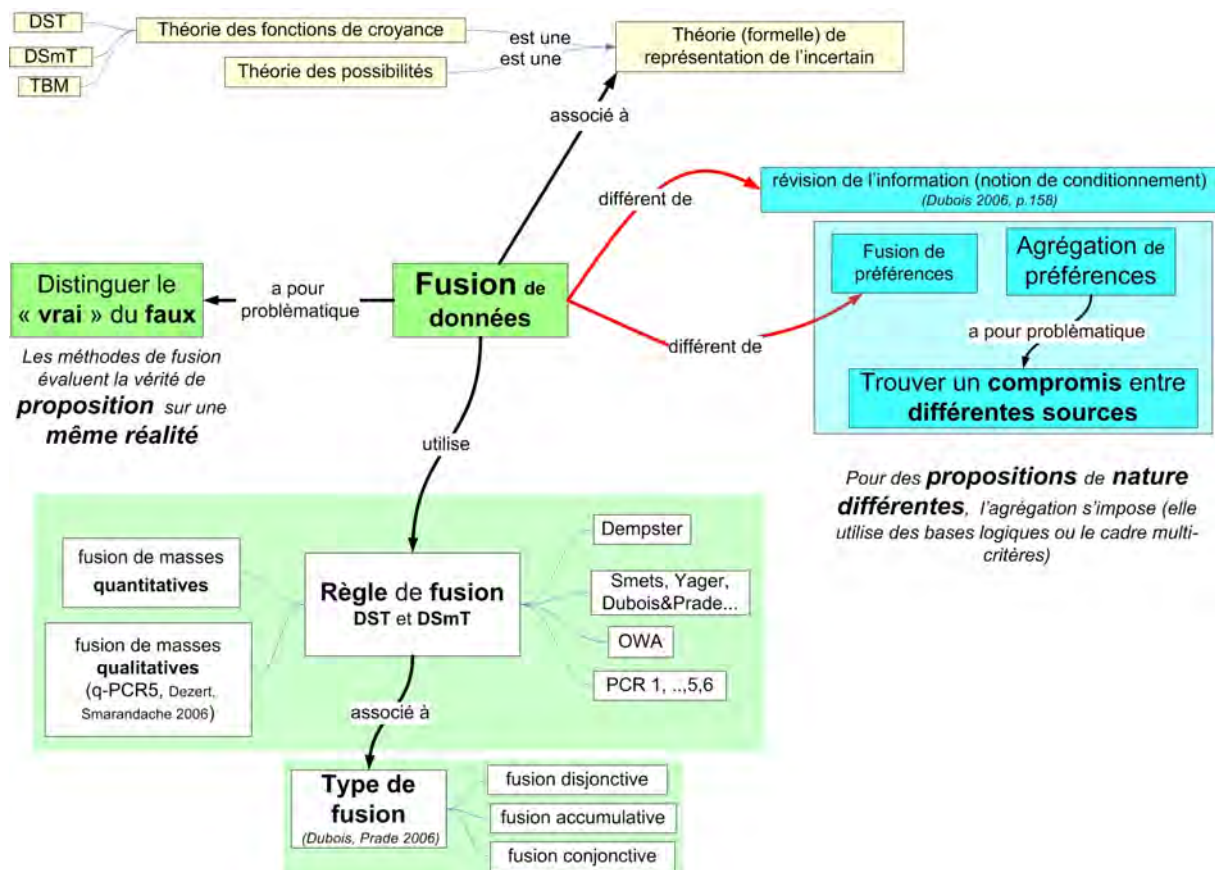


FIGURE 6.2 – Différence entre les contextes de fusion d'information et d'agrégation de préférences

Notre problématique est à la frontière

Notre problématique se retrouve positionnée entre les deux approches. Il s'agit en effet de décider sur la base de plusieurs critères plus ou moins importants évalués par des sources plus ou moins fiables et conflictuelles. On souhaite de plus pouvoir identifier et tracer la qualité de l'information (associée à la notion de vérité) dans le processus. Connaissant les limites et domaines d'application des méthodes, nous recherchons donc une méthodologie qui puisse satisfaire au mieux ces objectifs et le cas échéant identifier et localiser les verrous compromettant une telle association en partant de l'évaluation des critères jusqu'à la décision.

Sur la base de l'analyse des méthodes existantes, nous allons exploiter des analogies dans les principes des méthodes. La fusion d'information, notamment dans le cadre de la théorie des fonctions de croyances, repose sur le choix d'un cadre de discernement commun qui permet de combiner des informations sur un même référentiel. L'agrégation multicritères, pour les méthodes d'agrégation totale tout du moins (*MAUT*, *AHP* par exemple), nous semble procéder d'une même logique. Les fonctions d'utilité établissent une correspondance implicite entre des évaluations de critères faites sur des échelles quelconques, sous des formes numériques, symboliques avec une structure de préférence commune. Cette proximité sera utilisée dans le cadre de la méthodologie proposée mais cette équivalence est pressentie comme étant le point central de la démarche.

6.3 Les principes d'une nouvelle méthodologie

L'enjeu de développement concerne une méthodologie (dénommée *ER-MCDA*) contribuant à l'aide à la décision mais représentant et traitant de manière explicite les imperfections et les hétérogénéités des informations. En se plaçant dans un cadre de décision en univers certain, la question est de savoir si l'on peut exploiter conjointement les atouts des théories formelles de l'incertain et des méthodes d'aide multicritères à la décision hiérarchique pour :

- expliciter la structure de préférences établissant le lien entre les critères et l'objet de la décision dans un objectif de traçabilité ;
- dissocier l'observation et l'évaluation des données pour assurer leur intégration dans des systèmes d'information et autoriser leur réutilisation dans des cadres de décision multiples. Dans ce cadre, la saisie des informations et l'interprétation qui en est faite doit être effectuée dans des procédures différentes et pouvoir être décrite, modifiée séparément ;
- représenter l'incertitude et l'imperfection de l'évaluation des critères à la fois quantitatifs et qualitatifs utilisés à tous les stades de la décision ;
- prendre en compte des évaluations simultanées, successives, potentiellement conflictuelles des critères et fournir des éléments d'appréciation ;
- fournir une mesure de la qualité de l'imperfection des données pouvant être associée à un processus de stockage et de représentation des données.

Cette nouvelle méthodologie est développée dans le chapitre 8 (FIG. 6.3) sur la base des analyses effectuées dans les chapitres 4, 5 et dans cette synthèse (chapitre 6).

CHAPITRE 6. SYNTHÈSE : VERS UNE NOUVELLE MÉTHODOLOGIE POUR LA DÉCISION ET L'EXPERTISE

	Définition de la problématique - Objectifs
Partie 1	Chap. 1 Introduction générale
	Chap. 2 Expertise, risque et incertitude
Partie 2	Aide à la décision - Nature, représentation et traitement de l'information imparfaite
	Chap. 3 L'information : ses imperfections, les liens avec la décision et l'ingénierie des connaissances
Etat de l'art	Chap. 4 Processus et méthodes d'aide à la décision
	Chap. 5 Théories formelles pour l'information imparfaite
	Chap. 6 Synthèse : aide à la décision et imperfection de l'information
Partie 3	Développements et applications
	Chap. 7 Diagnostic, reconfiguration de modèles d'aide à la décision hiérarchiques
	Chap. 8 Fusion d'information et analyse multicritères hiérarchique (ER-MCDA)
	Chap. 9 Application (ER-MCDA)
Partie 4	Apports – Lacunes - Perspectives
	Chap. 10 Discussion
	Chap. 11 Conclusion
Annexes	

FIGURE 6.3 – Une nouvelle méthodologie *ER-MCDA* sera développée au chapitre 8

Troisième partie

Développements méthodologiques : Aide multi-critères à la décision et fusion d'information pour la gestion des risques naturels

Chapitre 7

Diagnostic et reconfiguration de modèles de décision hiérarchique

Introduction

L'expertise s'apparente à un processus de décision multicritères que l'on souhaite décrire et structurer pour aider à sa mise en œuvre. L'analyse d'un tel problème de décision peut s'appuyer sur des méthodologies existantes d'agrégation complète (analyse hiérarchique, utilité multi-attribut) ou partielle (sur-classement). Dans la pratique, les méthodes utilisées pour "aider à la décision", faire des choix, classer des actions présentent deux caractéristiques. Tout d'abord, elles sont souvent très empiriques et construites à partir des méthodes simplifiées ou élémentaires (somme pondérée) sans référence à des cadres explicites d'aide multicritères à la décision. Ensuite, elles concernent pour la plupart un grand nombre d'alternatives (sites, actions) dont l'évaluation n'est pas simultanée. Malgré les critiques pouvant être faites sur les méthodes utilisées voire sur l'absence de référence à une méthodologie explicite mise en œuvre, ces outils intègrent et représentent un savoir-faire et une connaissance experte indéniables. Être capable de les exploiter, de les analyser et les retranscrire sous une forme plus standardisée sont donc des enjeux majeurs.

Ce chapitre propose des éléments de diagnostic associés à ce type de méthodes avant de proposer une méthodologie permettant de caractériser les préférences associées à la conception de ces modèles et valoriser la connaissance experte qu'elles intègrent. Dans un second temps, une approche est proposée pour reconfigurer des modèles existants sous plusieurs formes hiérarchiques pour s'adapter de manière polyvalente à divers cadres de décision.

7.1 Diagnostic de modèles simples d'agrégation totale

7.1.1 Pertinence de l'agrégation additive

Dans le cadre de l'expertise des risques naturels, l'analyse du risque se fait sur la base d'équations utilisant plusieurs composantes relatives à l'aléa (décrivant le phénomène) et la vulnérabilité (voir 2.2.1, p. 26). Une première méthode pour mesurer le risque consiste, dans le cadre des approches économiques, à évaluer monétairement des dommages probabilisés dans le cadre de la théorie de l'utilité espérée. Nous avons vu qu'il existe d'autres approches où l'on effectue des croisements entre des classes qualitatives d'intensité, de fréquence, de vulnérabilité notamment dans le cadre d'application de zonage des risques. Ces combinaisons s'apparentent en fait à des agrégations multicritères non explicitées (FIG. 7.1).

7.1. DIAGNOSTIC DE MODÈLES SIMPLES D'AGRÉGATION TOTALE

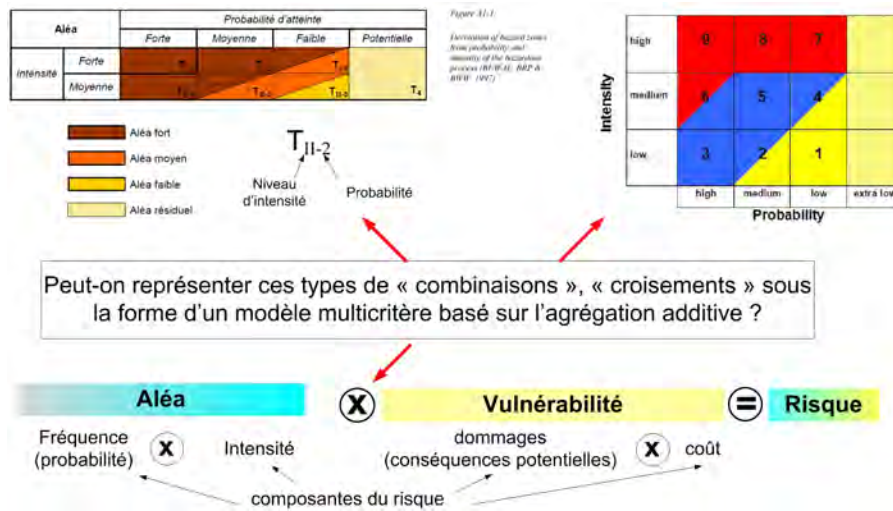


FIGURE 7.1 – Comment combiner les composantes du risque ?

La question posée est alors de savoir si toutes les méthodes d'agrégation permettent d'obtenir un résultat satisfaisant (Tacnet et Batton-Hubert, 2009) : sachant que je dispose d'un modèle de préférence global prédéterminé, est-ce que le principe d'agrégation retenu me permet de retrouver le résultat correspondant à mes préférences à partir des évaluations des critères ? L'agrégation additive largement utilisée dans les approches empiriques montre ici ses limites comme l'indique l'exemple suivant.

Un niveau de risque doit être déterminé en fonction de ses composantes relatives d'une part à l'aléa, et d'autre part à la vulnérabilité. Le problème d'analyse des composantes du risque est formulé comme un problème multicritères. Pour chacun des critères, on définit une utilité de manière arbitraire et empirique comme cela est fait dans de nombreux modèles existants. Le modèle exemple est un modèle à cinq critères correspondant aux habitants, aux infrastructures, à la morphologie, à l'histoire et à la nivo-climatologie. La vulnérabilité regroupe les critères habitants et infrastructures. Le critère aléa regroupe la morphologie, l'histoire et la nivo-climatologie. Pour chaque critère des classes d'évaluation sont affectées de poids (ou scores), assimilés à l'utilité partielle de cette classe d'évaluation. On évalue 9 sites successifs dans un modèle d'utilité additif : l'évaluation est simplement la somme des poids et correspond en fait au principe de la méthode "addition" de la méthode *Sites Sensibles Avalanches (SSA)* (FIG. 7.2).

CHAPITRE 7. DIAGNOSTIC ET RECONFIGURATION DE MODÈLES DE DÉCISION HIÉRARCHIQUE

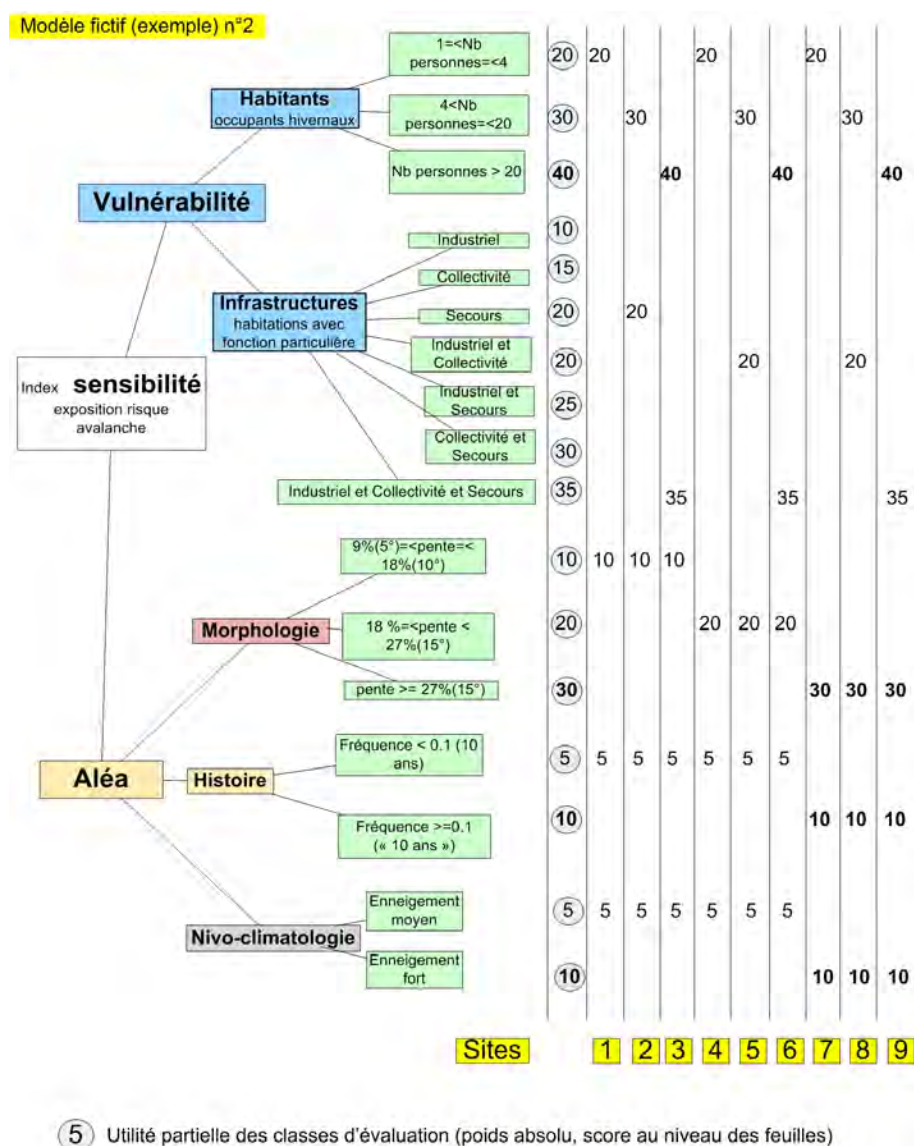


FIGURE 7.2 – Evaluation de sites dans un modèle fictif

On souhaite utiliser les résultats de l'agrégation multicritères pour définir un niveau de risque. Deux modèles de préférences définis sur la base de combinaison entre l'aléa et la vulnérabilité sont imaginés. Le premier modèle ne distingue pas deux situations de risque fort provenant soit d'un aléa fort et d'une vulnérabilité moyenne, soit d'un aléa moyen et d'une vulnérabilité forte. Le second modèle considère que la seconde combinaison est plus risquée (FIG. 7.3).

7.1. DIAGNOSTIC DE MODÈLES SIMPLES D'AGRÉGATION TOTALE

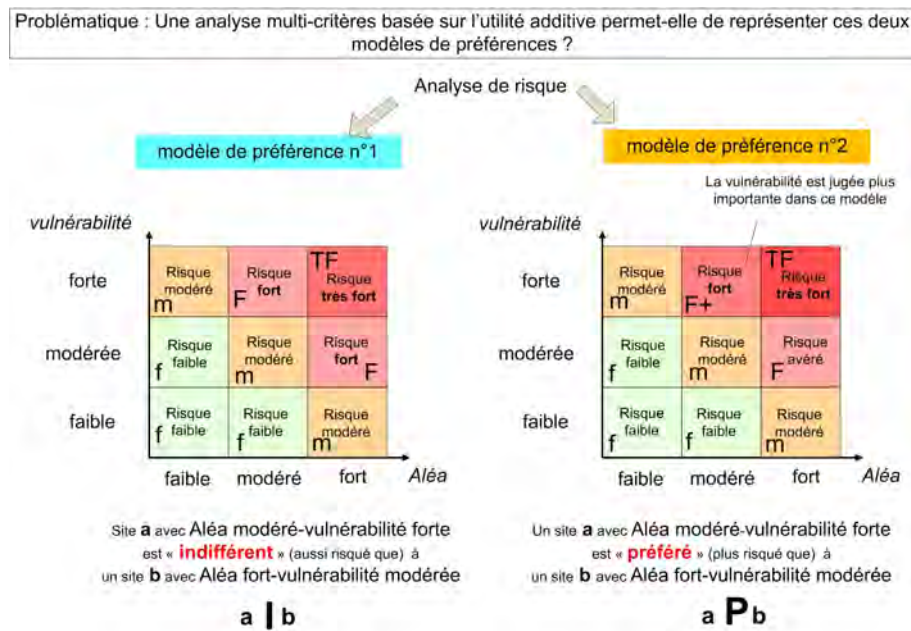


FIGURE 7.3 – Deux modèles de préférences associés à l'évaluation du niveau de risque

La série de sites S_i avec $i \in \{1, 2, \dots, 9\}$ (définis dans FIG. 7.2) sont évalués par addition des scores retenus pour chaque critère. Les scores des différents sites relativement à l'aléa permettent de positionner les différents sites dans les classes de niveau de risque correspondant au modèle de préférence n°1 soit $\{f, m, F, TF\}$ et au modèle de préférence n°2 soit $\{f, m, F, F^+, TF\}$ (FIG. 7.4). On obtient les relations suivantes :

- Pour le modèle n°1, on a $S_9 P S_6 I S_8 P S_3 I S_5 I S_7 P S_4 I S_1 I S_2$;
- Pour le modèle n°2, on a $S_9 P S_6 P S_8 P S_3 I S_5 I S_7 P S_4 I S_1 I S_2$;

La différence entre les deux modèles peut être observée entre les sites S_6 et S_8 . Ils sont indifférents ($S_6 I S_8$) dans le modèle n°1 car ils correspondent tous deux à un classement en risque fort (F). Dans le modèle n°2, le site S_6 est préféré au site S_8 ($S_6 P S_8$) car S_6 correspond à un classement fort (F^+) alors que le site S_8 est classé en risque avéré (F).

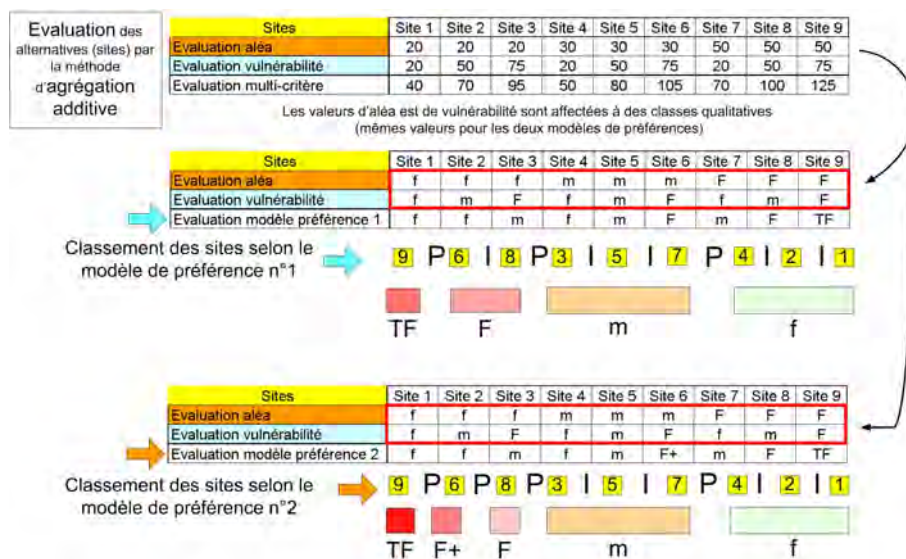


FIGURE 7.4 – Résultats de l'évaluation des sites selon les deux modèles de préférences

Pour être utilisé, le modèle d'agrégation additive impose que les préférences selon chaque critère et la préférence globale constituent des pré-ordres totaux (ce qui est le cas des deux modèles de préférences considérés) et doivent être indépendants préférentiellement. On peut vérifier l'indépendance préférentielle entre le critère *Alea* et le critère vulnérabilité noté *Vul*. En effet, les sites S_5, S_6, S_8, S_9 sont tels que :

$$\begin{cases} Alea(S_5) = Alea(S_6) = 30 \\ Alea(S_8) = Alea(S_9) = 50 \\ Vul(S_5) = Vul(S_8) = 50 \\ Vul(S_6) = Vul(S_9) = 75 \end{cases} \quad (7.1)$$

avec $S_6 P S_5 \Rightarrow S_9 P S_8$ pour les deux modèles de préférences.

On note U_1 la fonction d'utilité du décideur relative à l'aléa et U_2 la fonction d'utilité du décideur relative à la vulnérabilité. On a :

$$\begin{aligned} S_2 IS_4 \text{ soit } U_1(20) + U_2(50) &= U_1(30) + U_2(20) \\ S_3 IS_7 \text{ soit } U_1(20) + U_2(75) &= U_1(50) + U_2(20) \end{aligned}$$

d'où par différence

$$U_2(50) - U_2(75) = U_1(30) - U_1(50)$$

soit

$$\underbrace{U_1(50) + U_2(50)}_{S_8} = \underbrace{U_1(30) + U_2(75)}_{S_6}$$

Ceci équivaudrait donc à $S_6 I S_8$ alors que $S_6 P S_8$ dans le modèle de préférence n°2. Le modèle d'utilité additive ne permet donc pas de représenter la préférence globale correspondant au modèle n°2 du décideur.

7.1.2 Premier diagnostic de la méthode "Sites Sensibles Avalanches" (SSA)

La description des principes de la classification "Sites Sensibles Avalanches" (SSA) a conduit à différents questionnements (voir 2.3.3, p. 44). L'analyse de la méthode permet d'identifier quelques critères dont les caractéristiques ne seraient pas compatibles avec le principe d'une analyse multicritères hiérarchique notamment des cas de dépendance mutuelle et de conditionnement entre critères, ainsi que des critères peu nombreux dont les scores ne suivent pas un principe de maximisation (voir (Tacnet et Batton-Hubert, 2009)). Les exemples ci-dessous analysent plus en détail le dispositif existant à partir de résultats obtenus par la méthode dans sa version actuelle. A partir des évaluations réalisées par des observateurs, les sites d'avalanches sont évalués selon deux méthodes *addition* et *multiplication*. Les résultats d'évaluation des sites analysés sont répertoriés dans des bases de données et synthétisés à destination du public et des professionnels¹. Un extrait est reproduit ci-dessous (FIG. 7.5) :

1. www.avalanches.fr

7.1. DIAGNOSTIC DE MODÈLES SIMPLES D'AGRÉGATION TOTALE

Exemple de résultats de la méthode Sites Sensibles Avalanches (SSA)

N°	N° Dpt	INSEE	ID	NOM_COM	NOM_Site	CLPA	EPA	Autre_ref	PPR_COM	Addi	Sensib +	Multi	Sensib X	Synthese Sensibilités
1	74	74056	3394	CHAMONIX-MONT-BLANC	Le Brévent	86	6		Oui	275	Forte	17014	Forte	Forte
2	74	74056	3404	CHAMONIX-MONT-BLANC	Blaitière	99	30		Oui	240	Forte	13244	Forte	Forte
3	74	74056	3364	CHAMONIX-MONT-BLANC	La Fis	20	70		Oui	232	Forte	12672	Forte	Forte
4	74	74085	3469	CONTAMINES-MONTJOIE	Nivorin	5	1		Oui	230	Forte	12069	Forte	Forte
5	74	74056	3415	CHAMONIX-MONT-BLANC	Tacomaz	110, 111			Oui	225	Forte	12005	Forte	Forte
6	6	06073	740	ISOLA	Combe grosse	37		ISO 61	Oui	233	Forte	11850	Forte	Forte
7	9	09220	3220	ORLU			203		Oui	240	Forte	11591	Forte	Forte
135	5	05152	172	SAINT-MAURICE-EN-VALGODE	Château du Poët		13		Non	144	Douteuse	5168	Forte	Forte
136	74	74290	3696	VALLORCINE	Les posettes nord	16	16		Oui	148	Forte	5115	Forte	Forte
137	6	06013	640	BELVEDERE	Vallon de Paranova	13	14	EEL 6	Oui	143	Douteuse	5100	Forte	Forte
138	4	04006	2	ALLOS	La Tardée	36	12		Oui	148	Forte	5076	Forte	Forte
139	74	74056	3797	CHAMONIX-MONT-BLANC	Les Lanchers	92	3		Oui	142	Douteuse	5005	Forte	Forte
140	6	06073	739	ISOLA	Ravin de la Source			ISO 59	Oui	140	Forte	4968	Douteuse	Forte
141	74	74056	3391	CHAMONIX-MONT-BLANC	Lapaz	83			Oui	141	Douteuse	4968	Douteuse	Douteuse
142	6	06073	743	ISOLA	Pente des Algécos	76, 106		ISO 63	Oui	149	Forte	4950	Douteuse	Forte
143	74	74085	3471	CONTAMINES-MONTJOIE	Chovettaz	69			Oui	144	Douteuse	4928	Douteuse	Douteuse
144	74	74056	3379	CHAMONIX-MONT-BLANC	Rocheray	48	43		Oui	140	Douteuse	4899	Douteuse	Douteuse
145	9	09139	3209	HOSPITALET-PRES-L'ANDORR	Poussouillettes	23	23		Oui	142	Douteuse	4887	Douteuse	Forte
146	74	74056	3377	CHAMONIX-MONT-BLANC	Le Crey de la Vuarde	46	96		Oui	145	Forte	4876	Douteuse	Douteuse
147	74	74014	3336	ARACHES-LA-FRASSE	Epaule de Vêret	12	9		Oui	164	Forte	4875	Douteuse	Forte
148	74	74063	3427	CHATEL	Morclan1	1	20	17 à 21	Oui	147	Forte	4850	Douteuse	Forte
149	74	74056	3395	CHAMONIX-MONT-BLANC	Henriette d'Angeville	87	59		Oui	149	Forte	4848	Douteuse	Forte

source www.avalanches.fr - 07/09

FIGURE 7.5 – Méthode Sites Sensibles Avalanches : exemple de résultats d'évaluation

Les limites entre sensibilités faible et douteuse d'une part et sensibilités douteuse et forte d'autre part sont respectivement fixées à 105 et 145 pour la méthode *addition* et 2500, 5000 pour la méthode *multiplication*. L'analyse des transitions et de quelques valeurs permet de voir que les résultats des deux méthodes ne sont pas concordants et ne varient pas dans le même sens. On observe également de fortes disparités dans l'amplitude de l'évaluation entre les deux méthodes : pour un même site, égalité pour la méthode addition et forte différence pour la multiplication (FIG. 7.6).

	Classement par index addition croissant			Classement par index multiplication croissant		
Catégorie forte sensibilité	240	Forte	13244	Forte	11591	Forte
	240	Forte	11591	Forte		
	219	Forte	11528	Forte		
	218	Forte	10512	Forte		
L'one augmente, l'autre non...						
Ici variation équivalente des index						
Transition douteux-forte	155	Forte	4446	Douteuse	5168	Forte
	145	Forte	4066	Douteuse	4928	Douteuse
	145	Forte	4876	Douteuse	4876	Forte
	144	Douteuse	4928	Douteuse	4899	Douteuse
Transition faible-douteux	118	Douteuse	2392	Faible	2500	Douteuse
	106	Douteuse	2485	Faible	2485	Douteuse
	100	Faible	2500	Douteuse		
	100	Faible	2500	Douteuse		

Les deux sites sont-ils finalement vraiment équivalents ?

Les index ne varient pas dans le même sens

FIGURE 7.6 – Méthode Sites Sensibles Avalanches : Analyse de résultats d'évaluation

A noter que, de manière opérationnelle, l'interprétation des résultats se base sur une interprétation prudente des règles d'agrégation en considérant toujours la conclusion la plus défavorable. Les conclusions ne sont pas remises en cause, cette méthode restant indicative. Il s'agit seulement ici d'identifier et de proposer certaines améliorations méthodologiques : la démarche est en effet

originale et encapsule une grande partie de savoir-faire et d'expertise.

Ceci confirme que les méthodes d'agrégation ne sont pas toujours polyvalentes et les problèmes connus de compensation dans les méthodes d'agrégation additives.

En conclusion, la méthode *addition* n'est pas une simple somme. Une somme n'a de sens que si l'on évalue les critères dans les mêmes unités et sur la même échelle. Dans le cas précis du dispositif *SSA*, les scores représentent des utilités attachées aux critères (la vulnérabilité, la morphologie...). Au travers de la méthode *addition*, il faut en fait voir une méthode d'agrégation basée sur l'addition de fonctions d'utilité (voir EQ. 4.5, p. 96). La méthode *multiplication* s'apparente quant à elle une méthode d'agrégation mixte (voir EQ. 4.7, p. 96).

7.1.3 De nouveaux besoins

La méthode "Sites sensibles avalanches" (*SSA*) est donc une forme déguisée d'analyse multicritères basée sur une agrégation totale. La structure globale permet de la rattacher à une forme d'analyse multicritères hiérarchique de type *AHP* (voir 4.2.4, p. 97). Cette structuration hiérarchique, représentative du raisonnement de l'analyste et de la logique de construction de la structure globale de préférence n'est pas accessible. Les poids relatifs des différents niveaux de la hiérarchie ne sont pas explicités rendant difficile la comparaison par grands groupes de critères. La méthode *SSA* présente par contre des particularités essentielles : chaque alternative est évaluée individuellement et indépendamment des autres, les critères comportent un nombre variable de classes d'évaluation et ne sont pas tous évalués. Ceci la différencie nettement de la méthode *AHP* qui évalue toutes les alternatives au niveau du critère terminal.

Dans le cadre de la conception d'un nouveau modèle d'aide à la décision, le recours à une méthodologie explicite est évidemment de rigueur. Les systèmes existants ne sont malheureusement pas tous conçus dans des cadres standardisés. Ils exploitent un grand nombre de données et restent basés sur des analyses expertes qu'il faut expliciter et capitaliser : comment évaluer tel critère ? comment et de combien ce critère est-il plus important que tel autre ? Est-ce que les résultats d'évaluation peuvent servir dans d'autres cadres et comment ?

Pour représenter les critères intervenant dans un problème de décision, on peut soit se contenter de les lister (modèle "à plat") ou introduire une hiérarchie entre eux (structure hiérarchique) (FIG. 7.7). Ce dernier modèle, quand il se justifie, apporte plus d'information et facilite la compréhension.

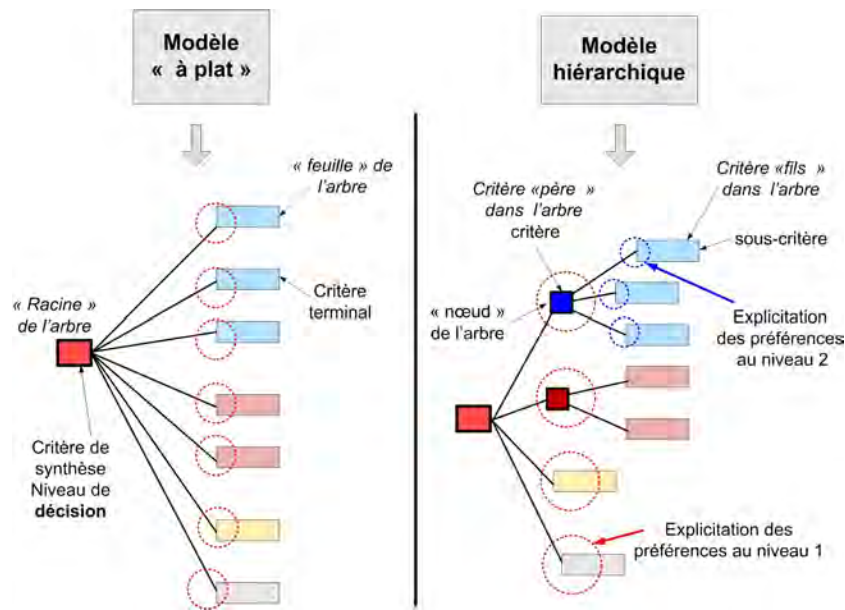


FIGURE 7.7 – Principes des modèles "à plat" et hiérarchiques

Objectif n°1 : Structuration hiérarchique Le premier objectif consiste à transformer les modèles (nombreux) se présentant sous la forme d'une série de critères dotés de fonctions d'utilité empiriques en une hiérarchie structurée capable d'évaluer les alternatives individuellement. Ceci constitue l'enjeu d'une forme de rétro-ingénierie du modèle de décision et de la structuration de modèle hiérarchique (FIG. 7.8).

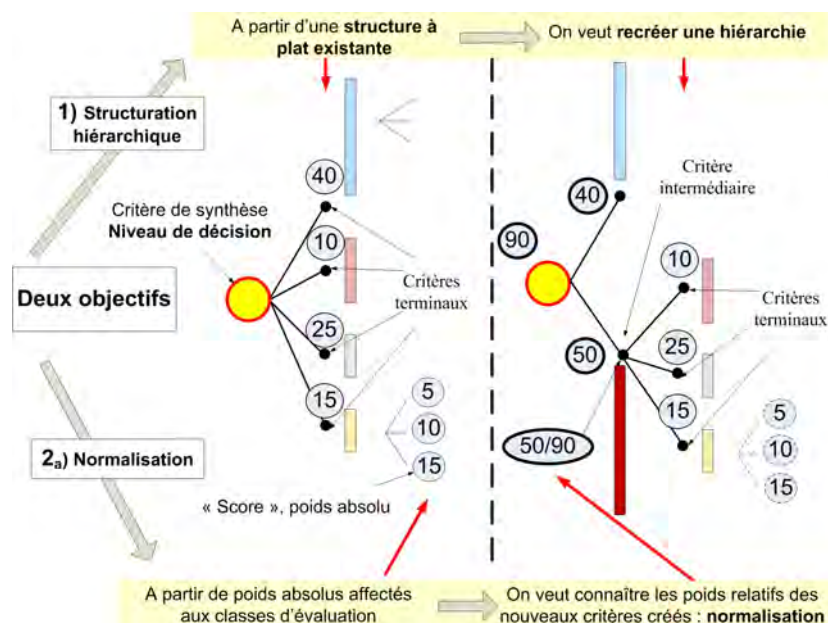


FIGURE 7.8 – Problématique n°1 : structurer un problème sous une forme hiérarchique

Objectif n°2 : Normalisation(2_a) et agrégation (2_b) Il s'agit ensuite de choisir un mode d'explicitation des préférences qui soit compatible avec des critères dont le nombre de classes d'évaluation est fortement déséquilibré et qui ne sont forcément évalués pour chaque alternative. La restructuration devra donc adopter des principes particuliers pour passer des fonctions d'utili-

CHAPITRE 7. DIAGNOSTIC ET RECONFIGURATION DE MODÈLES DE DÉCISION HIÉRARCHIQUE

lité empiriques (ou poids absolus, scores), définis au niveau des évaluations, aux poids affectés aux critères de la nouvelle hiérarchie : c'est l'enjeu des méthodes de normalisation définissant les poids relatifs de chaque critère, l'agrégation des poids ne constituant qu'un produit de ces poids relatifs (FIG. 7.9).

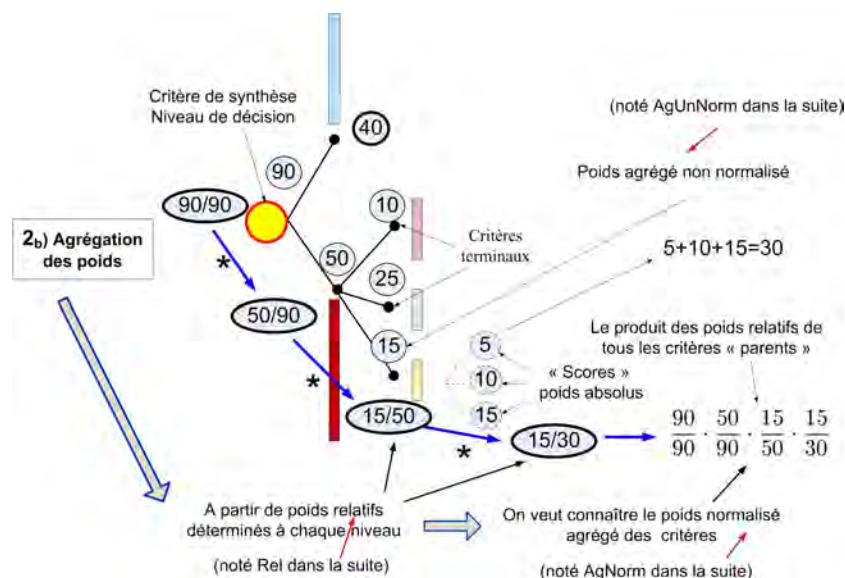


FIGURE 7.9 – Problématique n°2 : normaliser les poids de critères et les agréger

Objectif n°3 :Reconfiguration hiérarchique Enfin, une structure hiérarchique correspond à un modèle de préférences et à une organisation, parmi d'autres, de critères servant à évaluer la décision. Il est possible, sans changer le résultat d'une évaluation, de structurer les critères différemment pour analyser le problème de décision sous un angle nouveau et soit, valider le modèle de préférences, soit le modifier. C'est l'enjeu de la reconfiguration hiérarchique (FIG. 7.10).

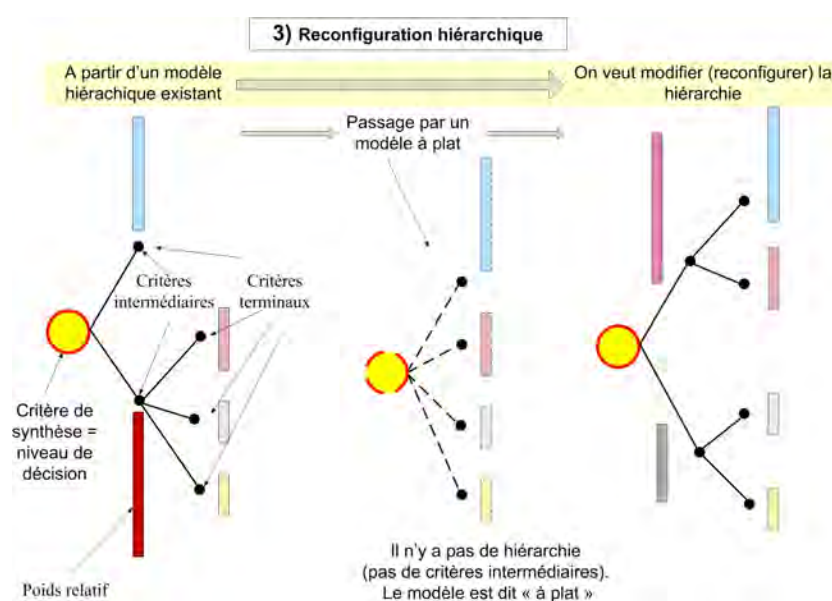


FIGURE 7.10 – Problématique n°3 : reconfigurer, changer la hiérarchie sans modifier le résultat d'évaluation

Les méthodologies développées ci-dessous concernent donc ces volets associés à la structuration hiérarchique, la normalisation et la reconfiguration des critères. La démarche n'est évidemment pas spécifique du cas d'application "Sites Sensibles Avalanches" mais s'applique à toutes les formes empiriques de modèles d'aide à la décision basés sur "l'addition de scores".

7.2 Vers des modèles de décision hiérarchiques polyvalents

Les modèles d'aide à la décision empiriques, essentiellement basés sur des principes de somme pondérée, n'ont pas toujours été conçus en respectant les standards et principes méthodologiques proposés pour l'application des méthodes multicritères hiérarchiques (Saaty, 1982). Pour exploiter la connaissance disponible dans ces modèles ainsi que les données qui leur sont associées, il est nécessaire de procéder à une rétro-ingénierie et une reconfiguration des modèles en imaginant des modèles de normalisation adaptés à cette problématique :

- Comment remonter au raisonnement et à ses principes en "dépliant" une structure ou en exhibant une arborescence entre des critères et des classes d'évaluation et un index de classement ?
- Comment passer d'un modèle hiérarchique à un autre correspondant à différentes visions d'un même problème (FIG. 7.11) ?

Outre leur caractère intuitif, les méthodes hiérarchiques multicritères présentent l'avantage d'autoriser des évaluations partielles des critères intermédiaires. Il suffit en effet d'interrompre le processus d'évaluation au niveau du critère à étudier pour avoir un index relatif au dit critère pour l'alternative étudiée (par exemple la vulnérabilité, les facteurs morphologiques ...).

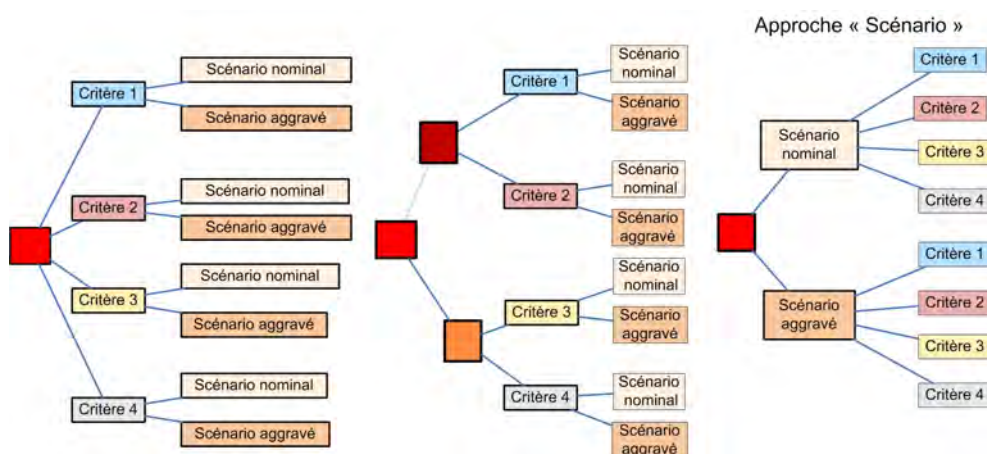


FIGURE 7.11 – La structuration d'un modèle hiérarchique correspond à une vision du problème de décision : il peut y en avoir différentes variantes

Dans un premier temps, une description des principes de codification d'une structure hiérarchique est proposée. Dans un second temps, des modes de transformation sont proposés pour transformer la structure des modèles hiérarchiques. Deux cadres de raisonnement sont envisagés :

- la première situation correspond à la re-configuration d'un modèle hiérarchique conçu de manière conventionnelle. Dans ce cas, la structuration hiérarchique du modèle est conduite du critère de synthèse ou de décision (racine de l'arbre) vers les critères terminaux en décomposant le problème des critères les plus importants et/ou généraux vers les moins importants et/ou spécifiques. A chaque niveau, les poids sont issus d'analyse des préférences à partir, par exemple, de matrices de préférences dans le modèle *AHP* ;
- la seconde situation envisagée correspond à un modèle empirique de type modèle à plat. Ce modèle correspond à un type de modèle où les préférences sont représentées par des

poids bruts ou absolus affectés au niveau des critères terminaux de l'arbre. Les feuilles de l'arbre hiérarchique correspondent aux évaluations des critères terminaux. Dans ce cas, des poids bruts, supposés choisis sur une échelle commune sont affectés directement aux feuilles.

7.2.1 Formalisation d'une structure hiérarchique

Modèle "critère-solution" et "critère-estimateur-solution"

Quand le nombre d'alternatives à traiter devient important, les méthodes d'aide multicritères peuvent être limitées. Les méthodes d'agrégation totale basées sur des comparaisons exhaustives par paires entre toutes les alternatives (méthode multicritères hiérarchique type *AHP*) ou les méthodes de sur-classement impliquant aussi la comparaison simultanée de toutes les alternatives sont difficilement applicables. Par conséquent, on recherche alors souvent un principe, certes critiquable d'un point de vue méthodologique, basé sur une approche *critère-estimateur-solution* (FIG. 7.12) qui permet une évaluation isolée de chaque alternative. Les modèles d'aide à la décision hiérarchiques classiques sont basés sur des modèles dit "critère-solution" (ou alternative). L'analyse porte tout d'abord sur la définition de la structure de préférences. Les critères sont identifiés et placés dans une hiérarchie. L'importance relative de chaque critère permet d'obtenir un poids.

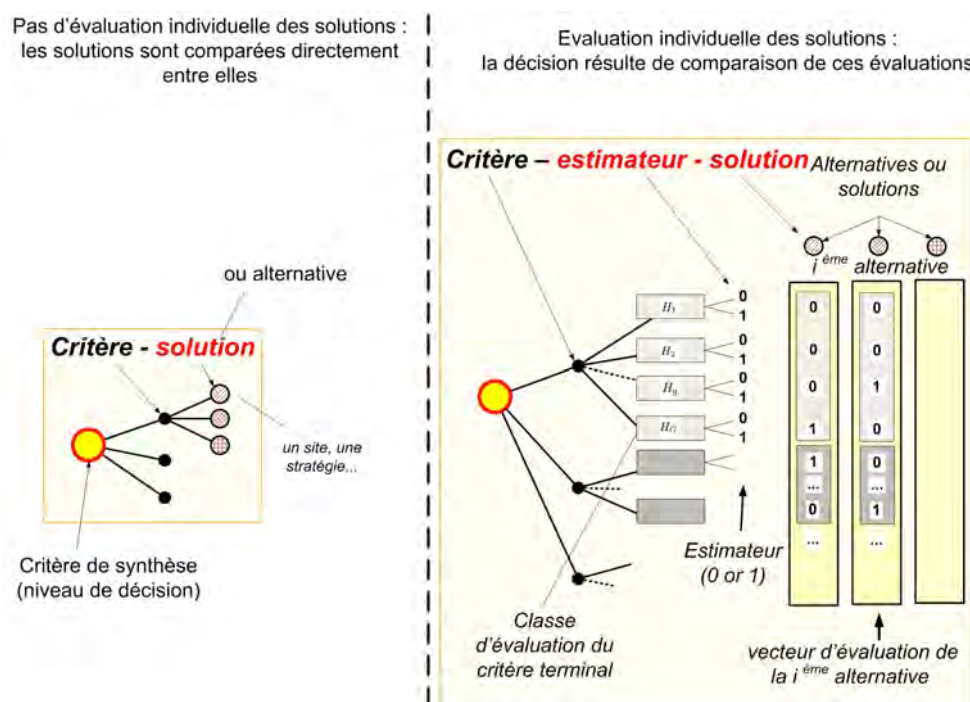


FIGURE 7.12 – Modèle d'évaluation : critère-alternative (standard) et critère-estimateur-solution

Codification d'une structure

Une structure hiérarchique représente une organisation des critères de décision en fonction de leur importance dans la problématique de décision considérée (FIG. 7.13). On considère une série de *vrai-critères* qualitatifs et quantitatifs évalués par l'appartenance à différentes classes. On distingue trois types de critères :

- les critères intermédiaires² correspondent aux critères qui se décomposent en au moins

2. medium level criterion

- deux sous-critères qui ne sont pas des critères d'évaluation ;
- les critères terminaux ou de base³ correspondent aux critères qui se décomposent en critères (ou classes) d'évaluation ;
 - les critères d'évaluation ou classes d'évaluation⁴ correspondent aux évaluations des critères pour chaque alternative. Le choix d'une classe d'évaluation est exclusif.

Soit une structure hiérarchique qui comprend au total M critères (tous niveaux confondus) et de profondeur maximale D (M et D entiers). Chaque critère est repéré par un vecteur CIV_j ($j \in \{1, 2, \dots, M\}$) dont la longueur correspond à la profondeur du critère dans l'arbre. Par analogie, on peut comparer ce vecteur CIV ⁵ à la numérotation hiérarchique de paragraphes dans un document. Par exemple, on considère le critère $C_{[1232]}$ dans un arbre hiérarchique de profondeur $D = 4$. Son vecteur d'identification est $[1232]$ d'une longueur de $l = 4$. On a donc $r_1 = 1$, $r_2 = 2$, $r_3 = 3$ et $r_4 = 2$. $C_{[1232]}$ représente le 2^{ème} sous-critère du critère $C_{[123]}$.

Soit C_{CIV_p} un critère de niveau intermédiaire l dans la hiérarchie avec $p \in \{1, 2, \dots, M\}$ et $l \in \{1, 2, \dots, D\}$ (p et l entiers). Le critère C_{CIV_p} est décrit par un vecteur d'identification $CIV_p = [r_1, \dots, r_k, \dots, r_l]$ (FIG. 7.14). Ce critère est décomposé en n sous-critères notés $C_{[CIV_p, k]}$ avec $k \in \{1, 2, \dots, n\}$ et $[CIV_p, k]$ représentant la concaténation du vecteur CIV_p et de l'entier k soit le vecteur $CIV = [r_1, \dots, r_k, \dots, r_l, k]$. Les sous-critères sont donc repérés par un vecteur de longueur $l + 1$.

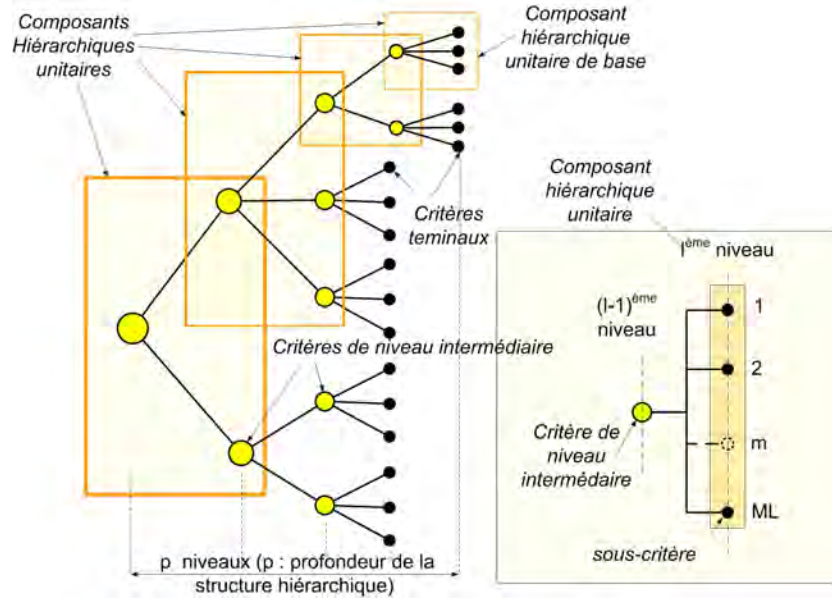


FIGURE 7.13 – Composants (hiérarchiques) unitaires d'un modèle hiérarchique

3. basic level criterion
 4. evaluation grades
 5. Criterion Identification Vector

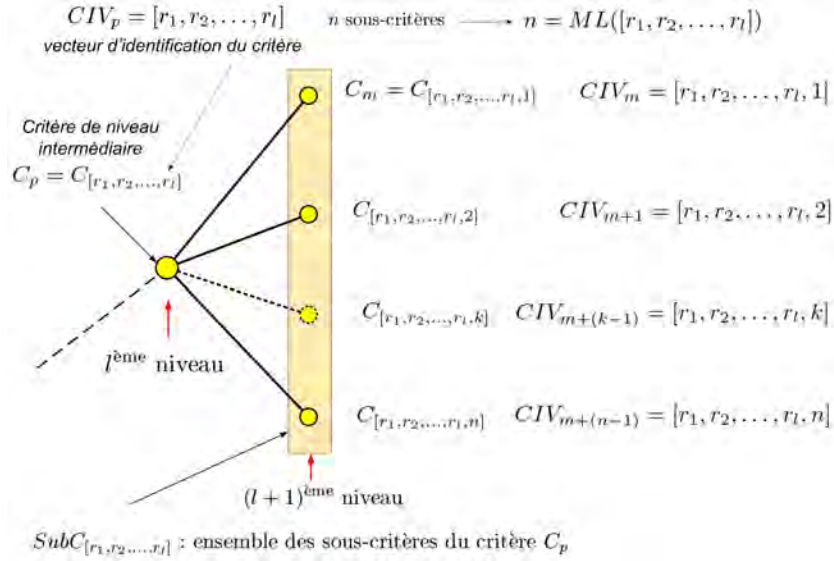


FIGURE 7.14 – Vecteurs d'identification des critères

7.2.2 Typologie et normalisation des pondérations

Valuations et pondérations absolues, agrégées, normalisées

Dans le cas d'un modèle hiérarchique conçu de manière classique, les préférences s'expriment au travers de pondérations affectées à chaque critère correspondant au même niveau de la hiérarchie et les poids calculés sont obligatoirement normalisés. L'agrégation des poids se fait en multipliant les poids d'un niveau supérieur avec les poids des niveaux inférieurs (FIG. 7.15).

Dans le cas d'un modèle "à plat", les préférences de l'analyste n'apparaissent pas directement et sont représentées par des valeurs absolues affectées à chacune des classes d'évaluation des critères. Ces valeurs portent en elle la masse d'importance dans le modèle de décision. Il n'y a pas de notion de comparaison relative entre les classes d'évaluation d'un critère donné.

Dans un modèle hiérarchique, pour un critère donné, on définit les différents types de pondérations suivants :

- Le poids agrégé absolu correspond à l'importance du critère considéré sur la base de tous les critères qui dépendent du dit critère. Il est calculé sur la base des poids absolus des sous-critères. La valeur retenue dépend du principe de normalisation ;
- le poids relatif représente le poids normalisé d'un critère par rapport à tous les critères du même niveau ;
- le poids agrégé normalisé représente le produit (normalisé) du poids normalisé du critère-père par le poids relatif du critère ;
- le poids absolu n'est défini que pour une classe d'évaluation. Il correspond au poids affecté par le concepteur du modèle à la classe d'évaluation dans un modèle "à plat".

Dans un modèle de type somme pondérée, ces valeurs sont choisies sur une échelle cardinale et attribuées aux classes d'évaluation des critères. Chacun des critères est évalué par le biais d'une valeur absolue : cette valeur est directement utilisée dans l'agrégation (par exemple, la somme pondérée). Pour chaque critère, l'appartenance à une classe d'évaluation est exclusive et le nombre de classes par critères peut être variable. Les pondérations absolues affectées à chacun de ces critères peuvent, par exemple, résulter d'une analyse d'un groupe d'expert qui n'a pas conservé les traces et le mode de raisonnement associé à la définition de ces poids. On peut souhaiter les utiliser dans un autre contexte de décision dans le cadre d'étude de sensibilité par rapport au modèle. En l'état, les pondérations absolues affectées à chacun des

critères ne permettent pas de calculer directement les préférences associées à chacun d'entre eux. Des regroupements des critères peuvent être proposés selon différents modèles.

Principes de calcul de la normalisation et l'agrégation

La normalisation est considérée comme ascendante (de la droite vers la gauche sur les schémas ou des feuilles de l'arbre vers la racine⁶). L'agrégation est descendante (de la gauche vers la droite sur les schémas ou de la racine vers les feuilles de l'arbre). Soient une structure hiérarchique comprenant M critères (hors critère racine de l'arbre) et le critère C_m comprenant k_m sous-critères avec $m \in \{1, 2, \dots, M\}$. Les principes de la normalisation puis de l'agrégation des poids sont les suivants :

Normalisation (ascendante) : Chaque sous-critère noté $C_{[m;j]}$ (avec $j \in \{1, 2, \dots, k_m\}$) est affecté d'un poids agrégé non normalisé noté $w_{[m;j]AgUnNorm}$ obtenu dans le sens ascendant (des feuilles vers la racine) à partir des poids agrégés non normalisés de ses propres sous-critères. Pour un niveau donné, le poids normalisé (ou relatif) du critère $C_{[m;j]}$ se définit par rapport aux sous-critères de même niveau et issu du critère C_m par $w_{[m;j]Norm} = w_{[m;j]Rel}$.

Agrégation (descendante). Sur la base de tous les poids normalisés calculés à chaque niveau pour chacun des sous-critères, on calcule le poids agrégé normalisé de manière descendante (de la racine vers le sous-critère considéré) sous la forme $w_{[m;j]AgNorm} = w_{[m]AgNorm} \cdot w_{[m;j]Norm}$.

Cas particulier : si le critère C_m correspond à la racine de l'arbre hiérarchique, on a pour chacun de ses sous-critères, l'égalité suivante : $w_{[m;j]AgNorm} = w_{[m;j]AgUnNorm} = w_{[m;j]Norm}$.

Deux phases d'agrégation/normalisation existent au niveau des feuilles et aux niveaux des critères terminaux et intermédiaires. Elle s'opère selon deux sens "ascendant" et "descendant" : calcul des poids relatifs des feuilles vers la racine de la structure (sens "ascendant" de normalisation) puis agrégation des poids normalisés de la racine vers les feuilles (sens descendant) (FIG. 7.15).

6. On voit ici que notre arbre est virtuel ...

Sur ces bases, on considérera que deux modèles hiérarchiques sont équivalents si les mêmes évaluations des critères terminaux produisent la même évaluation au niveau du critère terminal.

Plusieurs modes de normalisation sont nécessaires. Dans le cas d'un modèle de type "critère-estimateur-solution" résultant d'une rétro-analyse d'un modèle "à plat" existant, on peut être confronté au cas où les nombres de classes d'évaluation des critères terminaux sont très différents d'un critère à un autre. La normalisation classique, de type somme, consiste, pour l'ensemble de classes d'évaluation d'un critère terminal donné, à diviser le poids absolu de chaque classe d'évaluation par la somme des poids absolus de ces classes d'évaluation. Si on augmente le nombre de classes d'évaluation, on imagine facilement que la part relative de chaque classe d'évaluation va diminuer (et peser moins lourd dans l'agrégation pour l'évaluation de l'alternative étudiée) alors que la classe d'évaluation peut correspondre à un critère important dans le modèle global. Pour conserver un résultat qui soit intuitif et représentatif des souhaits de l'analyste, il faut donc imaginer d'autres modes de normalisation.

Principes de la normalisation. La normalisation vise à exprimer les poids dans le même référentiel de comparaison. La normalisation concerne les modèles dans lesquels les poids ont été affectés directement au niveau des feuilles. On considère que des poids absolus non normalisés⁷ ont été définis pour les m critères d'un modèle "à plat". Pour chaque modèle de normalisation (noté ModeleX⁸) et pour chaque critère, on cherche à calculer :

8. ModelerX peut être le modèle Somme (S), le modèle Maximum (M) ...

- un poids absolu (non normalisé) agrégé noté $w_{AgUnNormModeleX}$ ⁹ ;
- un poids relatif $w_{RelModeleX}$;
- un poids agrégé normalisé $w_{AgNormModeleX}$.

La question du choix d'un modèle de normalisation ne se pose donc qu'à partir du moment où le modèle repose sur une affectation de poids absolus au niveau des feuilles (classes d'évaluation du modèle) dans une configuration de modèle dit "à plat"¹⁰. Quatre modèles de normalisation sont envisagés dans le modèle hiérarchique choisi pour reconfigurer le modèle à plat initial : le modèle *Somme* (suffixe *Sum*), le modèle *Maximum* (suffixe *Max*), le modèle *SommeMax* (suffixe *SumMax*) et le modèle *SommeMaxFeuille* (suffixe *SumMaxLeaf*).

Les principes généraux des méthodes sont décrits ci-dessous (pour plus de détails voir en annexe G. Des exemples détaillés de l'application de ces principes de normalisation et le mode d'implémentation en lien avec les développements informatiques¹¹ sont fournis en annexe G.1, p. 363.

Modèle de normalisation *S* : *Somme*

Pour permettre une comparaison avec les autres méthodes de normalisation, on envisage de façon distincte le cas d'un critère terminal et le cas des critères intermédiaires (FIG. 7.16).

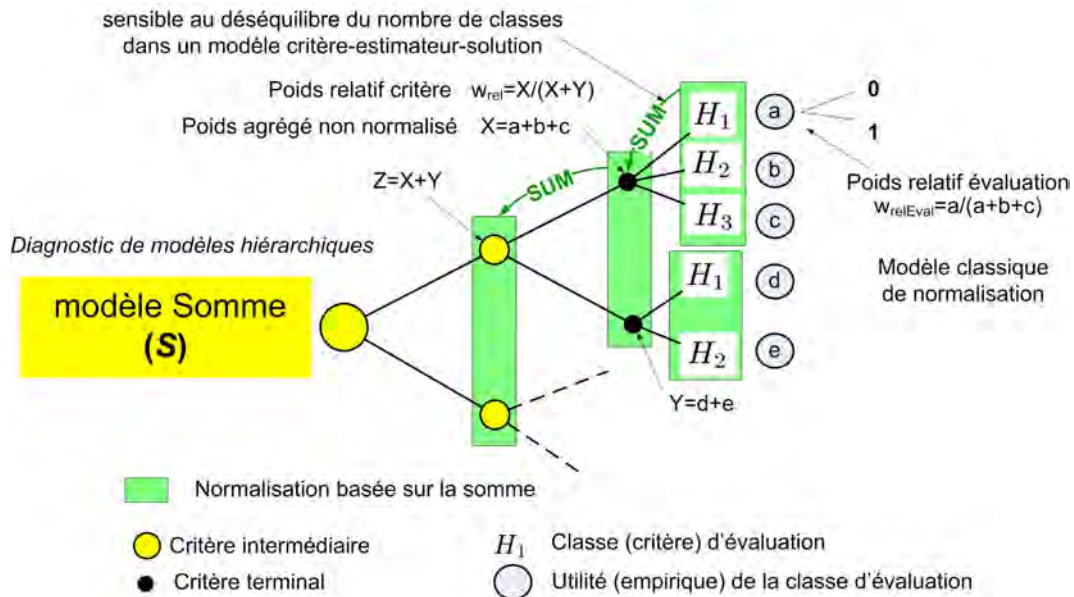


FIGURE 7.16 – Rétro-ingénierie de modèles hiérarchiques : principe du modèle de normalisation *Somme*(S)

Cas d'un critère terminal : au niveau d'un critère terminal, ce modèle de normalisation *Somme* (ou modèle S^{12}) consiste à diviser le poids absolu de chaque classe d'évaluation par la somme des poids absolus de ces classes d'évaluation (FIG. 7.22)¹³.

Soit un critère terminal noté $C_{[m]}$ décomposé en k_m classes (critères) d'évaluation notées $C_{[m;j]}$ avec $j \in \{1, 2, \dots, k_m\}$. On suppose, du fait du mode de création du modèle, que chaque

9. Agregate Un-normalized

10. flat model

11. Modèle *ER* – *MCDA* sous Matlab®

12. Sum

13. voir implémentation en G.1.1, p. 365

CHAPITRE 7. DIAGNOSTIC ET RECONFIGURATION DE MODÈLES DE DÉCISION HIÉRARCHIQUE

classe d'évaluation $C_{[m;j]}$ est affectée d'un poids absolu noté $w_{eval_{m,j}}$. L'objectif est ici de normaliser les poids de l'ensemble des critères de la structure hiérarchique reconfigurée.

Dans le modèle *Somme*, pour chaque classe d'évaluation (sous-critère) $C_{[m;j]}$ d'un critère terminal $C_{[m]}$, le poids relatif est égal à :

$$w_{evalRelSum_{m,j}} = \frac{w_{eval_{m,j}}}{w_{[m]AgUnNormSum}}$$

$$\text{où } w_{[m]AgUnNormSum} = \sum_{j=1}^{k_m} w_{eval_{m,j}}$$

$w_{[m]AgUnNormSum}$ représentant le poids agrégé non normalisé du critère terminal $C_{[m]}$

avec $k_m = ML(CIV_m) = ML([r_1, r_2, \dots, r_l])$ représentant le nombre de sous-critères du critère C_m

Sur la figure (FIG. 7.16) :

- a, b, c représentent le poids d'une classe d'évaluation $C_{[m;j]}$ noté $w_{eval_{m,j}}$
- X représente le poids agrégé non normalisé du critère terminal $C_{[m]}$ noté $w_{[m]AgUnNormSum}$
- $w_{relEval}$ est le poids relatif d'une classe d'évaluation noté $w_{evalRelSum_{m,j}}$

Cas d'un critère intermédiaire : la normalisation par le modèle *Somme* (S) consiste, pour l'ensemble des sous-critères $C_{[m;j]}$ du critère intermédiaire $C_{[m]}$ à normaliser, à diviser les poids agrégés non normalisés de chaque sous-critère ($w_{[m;j]AgUnNormSum}$) par la somme totale de tous les poids agrégés non normalisés des sous-critères de même niveau du critère étudié ($w_{[m]AgUnNormSum}$) (FIG. 7.16).

Dans le modèle *Somme*, pour chaque sous-critère $C_{[m;j]}$ du critère $C_{[m]}$, le poids relatif est défini par :

$$w_{[m;j]RelSum} = \frac{w_{[m;j]AgUnNormSum}}{w_{[m]AgUnNormSum}}$$

$$\text{où } w_{[m]AgUnNormSum} = \sum_{j=1}^n w_{[m;j]AgUnNormSum}$$

$w_{[m]AgUnNormSum}$ représentant le poids agrégé non normalisé du critère terminal $C_{[m]}$

avec $n = ML(CIV_m) = ML([r_1, r_2, \dots, r_l])$ représentant le nombre de sous-critères du critère C_m

Sur la figure (FIG. 7.16) :

- X, Y sont les poids agrégés non normalisés des sous-critères $C_{[m;j]}$ notés $w_{[m;j]AgUnNormSum}$
- Z représente le poids agrégé non normalisé du critère $C_{[m]}$ noté $w_{[m]AgUnNormSum}$
- w_{rel} est le poids relatif du sous-critère $C_{[m;j]}$ noté $w_{[m;j]RelSum}$

A partir des poids relatifs, les poids agrégés normalisés de chaque sous-critère $C_{[m;j]}$ sont calculés de la racine vers les feuilles selon l'expression suivante : $w_{[m;j]AgNormSum} = w_{[m]AgNormSum} \cdot w_{[m;j]RelSum}$.

Cette méthode est la méthode standard de normalisation. Néanmoins, dans les cas où les critères terminaux ont des nombres de sous-critères (classes d'évaluation) différentes, cette méthode pénalise les critères comportant un grand nombre de sous-critères. Dans ces cas, nous proposons de **normaliser** les **poids absolus agrégés** sur la base du **maximum** au lieu de la somme (modèle *SM*).

Modèle de normalisation M : *Maximum*

Cas d'un critère terminal : Au niveau d'un critère terminal, ce modèle de normalisation *Maximum* (ou modèle M^{14}) consiste à diviser le poids absolu de chaque classe d'évaluation par le maximum des poids absolus de ces classes d'évaluation (FIG. 7.17)¹⁵.

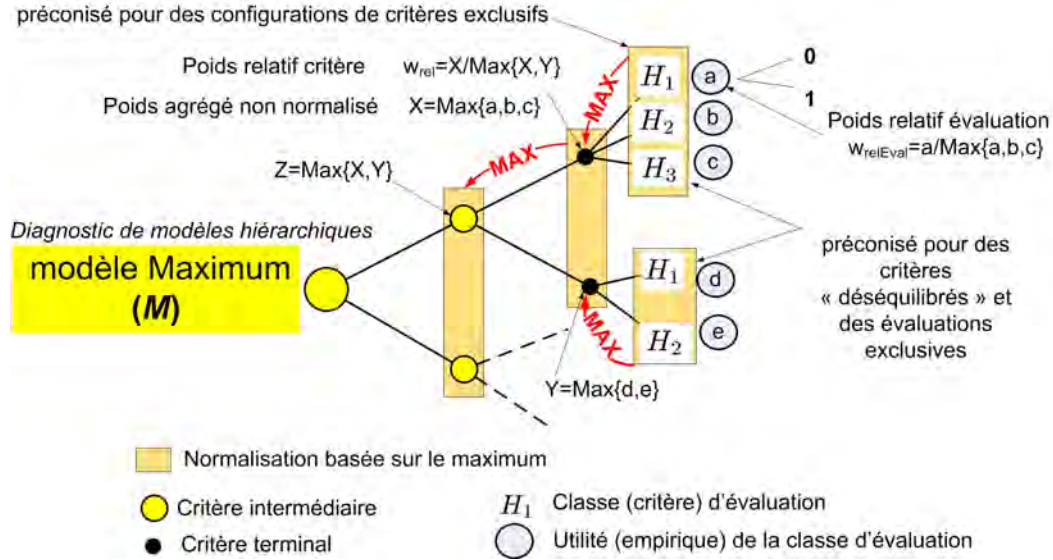


FIGURE 7.17 – Rétro-ingénierie de modèles hiérarchiques : principe du modèle de normalisation *Maximum*(M)

Comme dans le cas précédent, on considère un critère terminal noté $C_{[m]}$ décomposé en k_m classes (critères) d'évaluation notées $C_{[m;j]}$ avec $j \in \{1, 2, \dots, k_m\}$. Chaque classe d'évaluation $C_{[m;j]}$ est affectée d'un poids absolu noté $w_{eval_{m,j}}$.

Dans le modèle *Maximum*, pour chaque classe d'évaluation (sous-critère) $C_{[m;j]}$ d'un critère terminal $C_{[m]}$, le poids relatif est égal à :

$$w_{evalRelMax_{m,j}} = \frac{w_{eval_{m,j}}}{w_{[m]AgUnNormMax}}$$

$$\text{où } w_{[m]AgUnNormMax} = \text{Max}_{j=1}^{k_m}(w_{eval_{m,j}})$$

$w_{[m]AgUnNormMax}$ représentant le poids agrégé non normalisé du critère terminal $C_{[m]}$

avec $k_m = ML(CIV_m) = ML([r_1, r_2, \dots, r_l])$ représentant le nombre de sous-critères du critère C_m

Sur la figure (FIG. 7.17) :

- a, b, c représentent le poids d'une classe d'évaluation $C_{[m;j]}$ noté $w_{eval_{m,j}}$
- X représente le poids agrégé non normalisé du critère terminal $C_{[m]}$ noté $w_{[m]AgUnNormMax}$
- $w_{relEval}$ est le poids relatif d'une classe d'évaluation noté $w_{evalRelMax_{m,j}}$

Cas d'un critère intermédiaire : au niveau d'un critère intermédiaire, la normalisation consiste, pour l'ensemble des sous-critères $C_{[m;j]}$ du critère $C_{[m]}$, à diviser les poids agrégés non normalisés de chaque sous-critère ($w_{[m;j]AgUnNormMax}$) par le maximum de tous les poids agrégés non normalisés des sous-critères (de même niveau) du critère étudié ($w_{[m]AgUnNormMax}$) (FIG. 7.17).

14. Max

15. voir implémentation en G.1.1, p. 366

CHAPITRE 7. DIAGNOSTIC ET RECONFIGURATION DE MODÈLES DE DÉCISION HIÉRARCHIQUE

Dans le modèle *Maximum*, pour chaque sous-critère $C_{[m;j]}$ du critère $C_{[m]}$, le poids relatif est défini par :

$$w_{[m;j]RelMax} = \frac{w_{[m;j]AgUnNormMax}}{w_{[m]AgUnNormMax}}$$

où $w_{[m]AgUnNormMax} = \text{Max}_{j=1}^n (w_{[m;j]AgUnNormMax})$

$w_{[m]AgUnNormMax}$ représentant le poids agrégé non normalisé du critère terminal $C_{[m]}$

avec $n = ML(CIV_m) = ML([r_1, r_2, \dots, r_l])$ représentant le nombre de sous-critères du critère C_m

Sur la figure (FIG. 7.17) :

- X, Y sont les poids agrégés non normalisés des sous-critères $C_{[m;j]}$ notés $w_{[m;j]AgUnNormMax}$
- Z représente le poids agrégé non normalisé du critère $C_{[m]}$ noté $w_{[m]AgUnNormMax}$
- w_{rel} est le poids relatif du sous-critère $C_{[m;j]}$ noté $w_{[m;j]RelMax}$

A partir des poids relatifs, les poids agrégés normalisés de chaque sous-critère $C_{[m;j]}$ sont ensuite calculés de la racine vers les feuilles selon l'expression suivante : $w_{[m;j]AgNormMax} = w_{[m]AgNormMax} \cdot w_{[m;j]RelMax}$.

Cette méthode de normalisation n'a d'intérêt qu'à partir du moment où elle concerne des critères exclusifs les uns des autres. Ce principe n'a pas de sens pour les critères terminaux et intermédiaires sauf à considérer que ces critères ne sont pas évalués en même temps et ne contribuent pas, ensemble, à l'évaluation de l'alternative considérée.

Modèle de normalisation *SM* : *SommeMaximum*

Ce modèle de normalisation *SommeMaximum* ou modèle *SM*¹⁶ est un modèle mixte adoptant un principe de normalisation différent au niveau des classes d'évaluation des critères terminaux et des critères intermédiaires¹⁷.

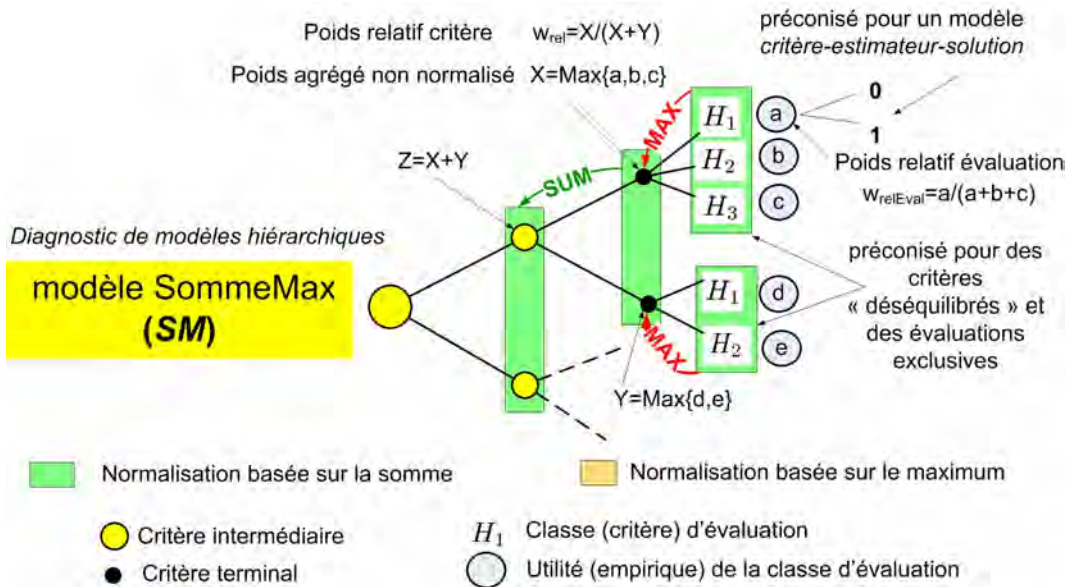


FIGURE 7.18 – Rétro-ingénierie de modèles hiérarchiques : principe du modèle de normalisation *SommeMaximum*(SM)

16. SumMax

17. voir implémentation en G.1.1, p. 367

Cas d'un critère terminal : au niveau d'un critère terminal, ce modèle de normalisation SM consiste à diviser le poids absolu de chaque classe d'évaluation par la somme des poids absolus de ces classes d'évaluation (FIG. 7.18). Par contre, c'est la valeur maximale des poids absolus des classes d'évaluation qui est affectée au critère terminal (et non pas la somme). En procédant ainsi, on s'affranchit du problème associé à un nombre important de classes dans un modèle "critère-estimateur-solution".

Soit un critère terminal noté $C_{[m]}$ décomposé en k_m classes (critères) d'évaluation notées $C_{[m;j]}$ avec $j \in \{1, 2, \dots, k_m\}$. On suppose, du fait du mode de création du modèle, que chaque classe d'évaluation $C_{[m;j]}$ est affectée d'un poids absolu noté $w_{eval_{m,j}}$.

Dans le modèle *SommeMaximum*, pour chaque classe d'évaluation (sous-critère) $C_{[m;j]}$ d'un critère terminal $C_{[m]}$, le poids relatif est égal à :

$$w_{evalRelSumMax_{m,j}} = \frac{w_{eval_{m,j}}}{\sum_{j=1}^{k_m} w_{eval_{m,j}}}$$

$$w_{[m]AgUnNormSumMax} = \text{Max}_{j=1}^{k_m} (w_{eval_{m,j}})$$

$w_{[m]AgUnNormSumMax}$ représentant le poids agrégé non normalisé du critère terminal $C_{[m]}$

avec $k_m = ML(CIV_m) = ML([r_1, r_2, \dots, r_l])$ représentant le nombre de sous-critères du critère C_m

Sur la figure (FIG. 7.18) :

- a, b, c représentent le poids d'une classe d'évaluation $C_{[m;j]}$ noté $w_{eval_{m,j}}$
- X représente le poids agrégé non normalisé du critère terminal $C_{[m]}$ noté $w_{[m]AgUnNormSumMax}$
- $w_{relEval}$ est le poids relatif d'une classe d'évaluation noté $w_{evalRelSumMax_{m,j}}$

Cas d'un critère intermédiaire : au niveau d'un critère intermédiaire, la normalisation par le modèle SM consiste à diviser les poids agrégés non normalisés de chaque sous-critère ($w_{[m;j]AgUnNormSumMax}$) par la somme totale de tous les poids agrégés non normalisés des sous-critères (de même niveau) du critère étudié ($(w_{[m]AgUnNormSumMax})$) (FIG. 7.18). La différence avec le modèle *Somme* (noté S) provient du fait que les sommes s'effectuent ici sur des valeurs maximales déterminées au niveau des critères terminaux.

Dans le modèle *SommeMaximum*, pour chaque sous-critère $C_{[m;j]}$ du critère $C_{[m]}$, le poids relatif est défini par :

$$w_{[m;j]RelSumMax} = \frac{w_{[m;j]AgUnNormSumMax}}{w_{[m]AgUnNormSumMax}}$$

$$\text{où } w_{[m]AgUnNormSumMax} = \sum_{j=1}^n w_{[m;j]AgUnNormSumMax}$$

$w_{[m]AgUnNormSumMax}$ représentant le poids agrégé non normalisé du critère terminal $C_{[m]}$

avec $n = ML(CIV_m) = ML([r_1, r_2, \dots, r_l])$ représentant le nombre de sous-critères du critère C_m

Sur la figure (FIG. 7.18) :

- X, Y sont les poids agrégés non normalisés des sous-critères $C_{[m;j]}$ notés $w_{[m;j]AgUnNormSumMax}$
- Z représente le poids agrégé non normalisé du critère $C_{[m]}$ noté $w_{[m]AgUnNormSumMax}$
- w_{rel} est le poids relatif du sous-critère $C_{[m;j]}$ noté $w_{[m;j]RelSumMax}$

A partir des poids relatifs, les poids agrégés normalisés de chaque sous-critère $C_{[m;j]}$ sont ensuite calculés de la racine vers les feuilles selon l'expression suivante : $w_{[m;j]AgNormSumMax} = w_{[m]AgUnNormSumMax} \cdot w_{[m;j]RelSumMax}$.

Modèle de normalisation *SML* : *SommeMaximumFeuille*

Ce modèle de normalisation *SommeMaximumFeuille* (ou modèle *SML*¹⁸) est également un modèle mixte adoptant un principe de normalisation différent au niveau des classes d'évaluation des critères terminaux et des critères intermédiaires¹⁹.

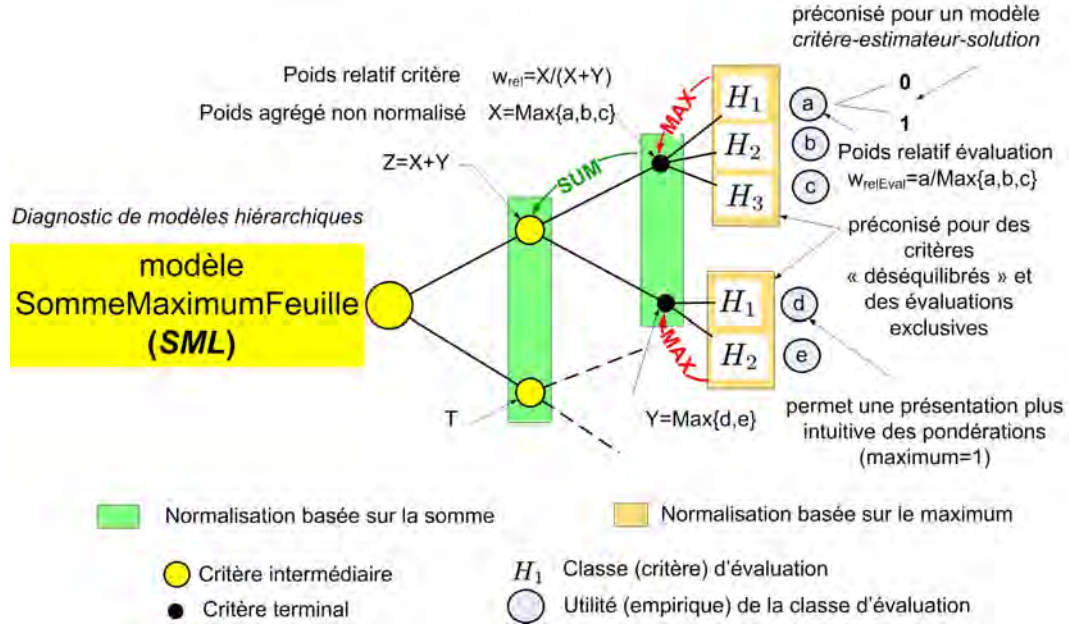


FIGURE 7.19 – Rétro-ingénierie de modèles hiérarchiques : principe du modèle de normalisation *SommeMaximumFeuille*(SML)

Cas d'un critère terminal : au niveau d'un critère terminal, ce modèle de normalisation *SommeMaximumFeuille* consiste à diviser le poids absolu de chaque classe d'évaluation par le maximum des poids absolus de ces classes d'évaluation (FIG. 7.19). La valeur maximale des poids absolus des classes d'évaluation est affectée au critère terminal. La différence avec le modèle *SommeMaximum* (noté *S*) provient ici du fait que la normalisation des classes d'évaluation s'effectue sur le maximum et non sur la somme (modèle *SM*) des poids absolus des classes d'évaluation.

Dans le modèle *SommeMaximumFeuille*, pour chaque classe d'évaluation (sous-critère) $C_{[m;j]}$ d'un critère terminal $C_{[m]}$, le poids relatif est égal à :

$$w_{evalRelSumMaxLeaf_{m,j}} = \frac{w_{eval_{m,j}}}{w_{[m]AgUnNormSumMaxLeaf}}$$

où $w_{[m]AgUnNormSumMaxLeaf} = \text{Max}_{j=1}^{k_m}(w_{eval_{m,j}})$ est le poids agrégé non normalisé du critère terminal $C_{[m]}$ avec $k_m = ML(CIV_m) = ML([r_1, r_2, \dots, r_l])$ représentant le nombre de sous-critères du critère C_m

Sur la figure (FIG. 7.19) :

- a, b, c représentent le poids d'une classe d'évaluation $C_{[m;j]}$ noté $w_{eval_{m,j}}$
- X représente le poids agrégé non normalisé du critère terminal $C_{[m]}$ noté $w_{[m]AgUnNormSumMaxLeaf}$
- $w_{relEval}$ est le poids relatif d'une classe d'évaluation noté $w_{evalRelSumMaxLeaf_{m,j}}$

18. SumMaxLeaf

19. voir implémentation en G.1.1, p. 368

Cas d'un critère intermédiaire : au niveau d'un critère intermédiaire, la normalisation par le modèle *SML* consiste à diviser les poids agrégés non normalisés de chaque sous-critère par la somme totale de tous les poids agrégés non normalisés des sous-critères (de même niveau) du critère étudié (FIG. 7.19).

Dans le modèle *SommeMaximumFeuille*, pour chaque sous-critère $C_{[m;j]}$ du critère $C_{[m]}$, le poids relatif est défini par :

$$w_{[m;j]RelSumMaxLeaf} = \frac{w_{[m;j]AgUnNormSumMaxLeaf}}{w_{[m]AgUnNormSumMaxLeaf}}$$

$$\text{où } w_{[m]AgUnNormSumMaxLeaf} = \sum_{j=1}^n w_{[m;j]AgUnNormSumMaxLeaf}$$

$w_{[m]AgUnNormSumMaxLeaf}$ représentant le poids agrégé non normalisé du critère terminal $C_{[m]}$ avec $n = ML(CIV_m) = ML([r_1, r_2, \dots, r_l])$ représentant le nombre de sous-critères du critère C_m

Sur la figure (FIG. 7.19) :

- X, Y sont les poids agrégés non normalisés des sous-critères $C_{[m;j]}$ notés $w_{[m;j]AgUnNormSumMaxLeaf}$
- Z représente le poids agrégé non normalisé du critère $C_{[m]}$ noté $w_{[m]AgUnNormSumMaxLeaf}$
- w_{rel} est le poids relatif du sous-critère $C_{[m;j]}$ noté $w_{[m;j]RelSumMaxLeaf}$

A partir des poids relatifs, les poids agrégés normalisés de chaque sous-critère $C_{[m;j]}$ sont ensuite calculés de la racine vers les feuilles selon l'expression suivante : $w_{[m;j]AgNormSumMaxLeaf} = w_{[m]AgNormSumMaxLeaf} \cdot w_{[m;j]RelSumMaxLeaf}$.

Ce modèle ne permet pas d'obtenir des poids normalisés au niveau des classes d'évaluation. En agrégeant de la racine vers les classes d'évaluation et en sommant les poids normalisés, on n'obtient pas une valeur totale de 1. Cette contrainte est essentielle dans le cas d'un modèle "critère-solution" ou les évaluations portent sur les alternatives. Dans le cas d'un modèle "critère-estimateur-solution", le choix d'une normalisation des classes d'évaluation sur le maximum n'est pas gênant. D'un point de vue conceptuel, il est même plus facile à interpréter : l'évaluation du critère terminal prend sa valeur maximale quand la classe d'évaluation choisie correspond à une contribution maximale au critère.

Synthèse sur les méthodes de normalisation

Les modèles de normalisation *SM* (et *SML*) sont les plus adaptés dans le cas de la structuration hiérarchique d'un modèle "critère-estimateur-solution". L'utilisation d'un mode de normalisation mixte associant le principe classique de normalisation basé sur la somme et sur le maximum (*SommeMaximum*) permet de fournir un résultat d'évaluation qui tolère des déséquilibres dans la hiérarchie. Ces modèles dissocient la normalisation au niveau des évaluations et au niveau des critères terminaux et intermédiaires. Il s'adapte particulièrement au cas des modèles empiriques dont la structure n'a pas forcément été équilibrée. Avec un modèle de normalisation de type somme, si un critère terminal comporte un grand nombre de classes d'évaluation, son poids relatif va être très important même si l'évaluation ne porte finalement que sur une seule valeur choisies parmi les différentes classes possibles. L'introduction du maximum permet de prendre en compte ce caractère exclusif de l'évaluation indépendamment du nombre de classes. Les poids obtenus permettent une représentation plus réaliste du modèle de préférence imaginé par l'analyste. L'utilisation du modèle de normalisation *SommeMaximum* permet de contourner le problème de compensation observé dans un modèle de normalisation *Somme* classique. Deux alternatives ayant le même résultat dans le cadre d'une agrégation additive d'utilités empiriques peuvent être discriminées dans un modèle. Le modèle *SommeMaximumFeuille*²⁰ permet d'ob-

20. présenté en annexe G.1.1, p. 368

tenir les mêmes résultats avec l'avantage d'une présentation plus intuitive des pondérations : la classe d'évaluation la plus importante a un poids relatif égal à 1.

Il faut avoir à l'esprit que les valeurs obtenues par ces modèles n'ont qu'un caractère relatif et comparatif et ne correspondent en aucun cas à une note absolue. Les nombres ne servent ici que de support du raisonnement. Il faut par contre être vigilant quant à l'utilisation qui est faite par la suite des poids agrégés. Leur somme n'est plus forcément égale à 1.

7.2.3 Définir des structures hiérarchiques équivalentes

La problématique globale vise à modifier la structure d'un modèle hiérarchique multicritères en conservant les mêmes résultats en terme d'agrégation. Cette transformation présente l'intérêt de pouvoir représenter et regrouper les critères selon des logiques différentes. Le modèle de décision peut ainsi évoluer et mettre en évidence des résultats correspondant à des modélisations différentes. L'analyse en retour d'un modèle de décision existant permet également d'explicitier les préférences des experts ayant élaboré le système.

Deux configurations principales peuvent être rencontrées. Dans le premier cas, le modèle existe sous une forme dite "à plat". Tous les critères sont des critères terminaux qui se décomposent en classes d'évaluation. Le nombre de classes d'évaluation peut varier d'un critère à un autre. Les poids absolus affectés aux classes d'évaluation sont des données du problème. Dans ce cas, la problématique est de représenter un modèle existant sous une forme hiérarchique pour mettre en évidence des regroupements thématiques de critères et mieux expliciter la logique du modèle de décision.

Dans le second cas, le modèle hiérarchique est créé selon la démarche classique à partir d'une décomposition en critères de plus en plus spécifiques. A chaque niveau de la hiérarchie, les préférences entre critères de même niveau sont analysées pour déterminer les pondérations relatives des critères. Ces pondérations sont établies sur la base d'une structure. La comparaison avec une autre structuration exploitant les mêmes critères permet d'autres interprétations des mêmes données.

Les questions posées sont les suivantes :

- comment peut-on expliciter et mettre en évidence les structures de préférences des différents experts en fonctions des critères ?
- comment peut-on analyser et comparer les groupes de critères à des niveaux supérieurs ?
- comment peut-on passer d'un modèle à un autre ? Transformer un modèle "à plat" en un modèle hiérarchique ?

En terme de mise en œuvre, les questions portent sur les méthodes de normalisation, l'analyse en retour des préférences et la comparaison de modèles hiérarchiques.

La démarche et la méthodologie portent sur trois problématiques et consistent à (FIG. 7.20) :

1. transformer un arbre à plat en une structure hiérarchique comprenant des poids normalisés à chacun des niveaux de la hiérarchie ou transformer un arbre hiérarchique en un autre arbre conduisant au même résultat d'évaluation (reconfiguration hiérarchique) ;
2. transformer un arbre hiérarchique en un arbre "à plat" pour le rendre compatible avec le processus de fusion *ER – MCDA* (aplatissement).

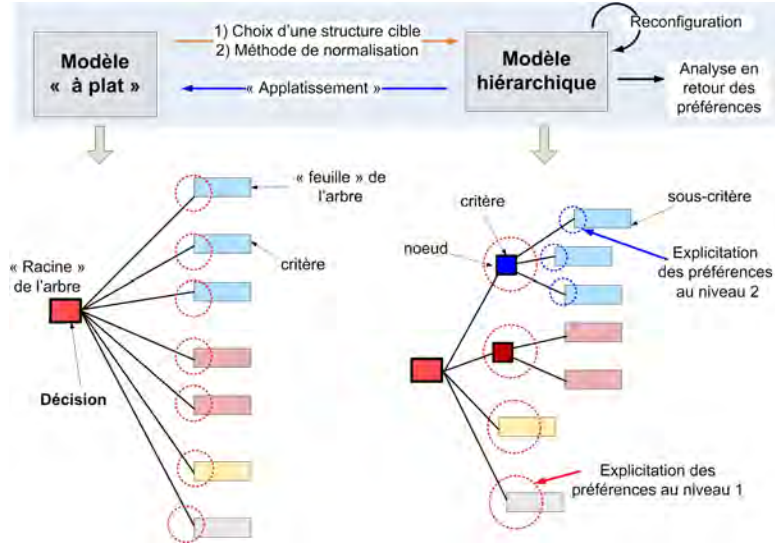


FIGURE 7.20 – Modèles de décision ”à plat” et hiérarchique

La reconfiguration hiérarchique impose de passer par une forme de modèle ”à plat” (FIG. 7.21). Deux cas sont donc possibles :

- Si le modèle initial est déjà un modèle ”à plat”, on a seulement une étape de restructuration, hiérarchisation ;
- Si le modèle initial est un modèle hiérarchique, deux phases sont nécessaires. La première correspond à l’”aplatissement” du modèle. La seconde étape comprend la proposition d’une nouvelle structure et la hiérarchisation.

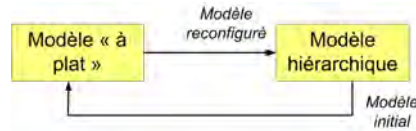


FIGURE 7.21 – Circuit de reconfiguration d’un arbre hiérarchique

Normalisation du modèle à plat

Soit un modèle ”à plat” comportant M critères (tous terminaux), chaque critère terminal C_m est décomposé en k_m classes (critères) d’évaluations notées $C_{[m;j]}$ avec $j \in \{1, 2, \dots, k_m\}$. Chaque classe d’évaluation $C_{[m;j]}$ est affectée d’un poids absolu noté $w_{eval_{m,j}}$ et d’un poids relatif $w_{evalRel_{m,j}}$. Ce poids relatif dépend du mode de normalisation retenu au niveau des classes (critères) d’évaluation (modèle somme ou maximum). On appelle j_m la classe d’évaluation retenue pour le critère C_m lors de l’évaluation d’une alternative. L’évaluation complète d’une alternative peut donc être représentée par un vecteur de la forme $[j_1, j_2, \dots, j_m, \dots, j_M]$ avec $j_m \in \{1, 2, \dots, k_m\}$.

L’évaluation d’une alternative i est calculée par $Eval_{Flat_i} = \sum_{m=1}^M w_{[m]} AgNorm \cdot w_{evalRel_{m,j}}$.

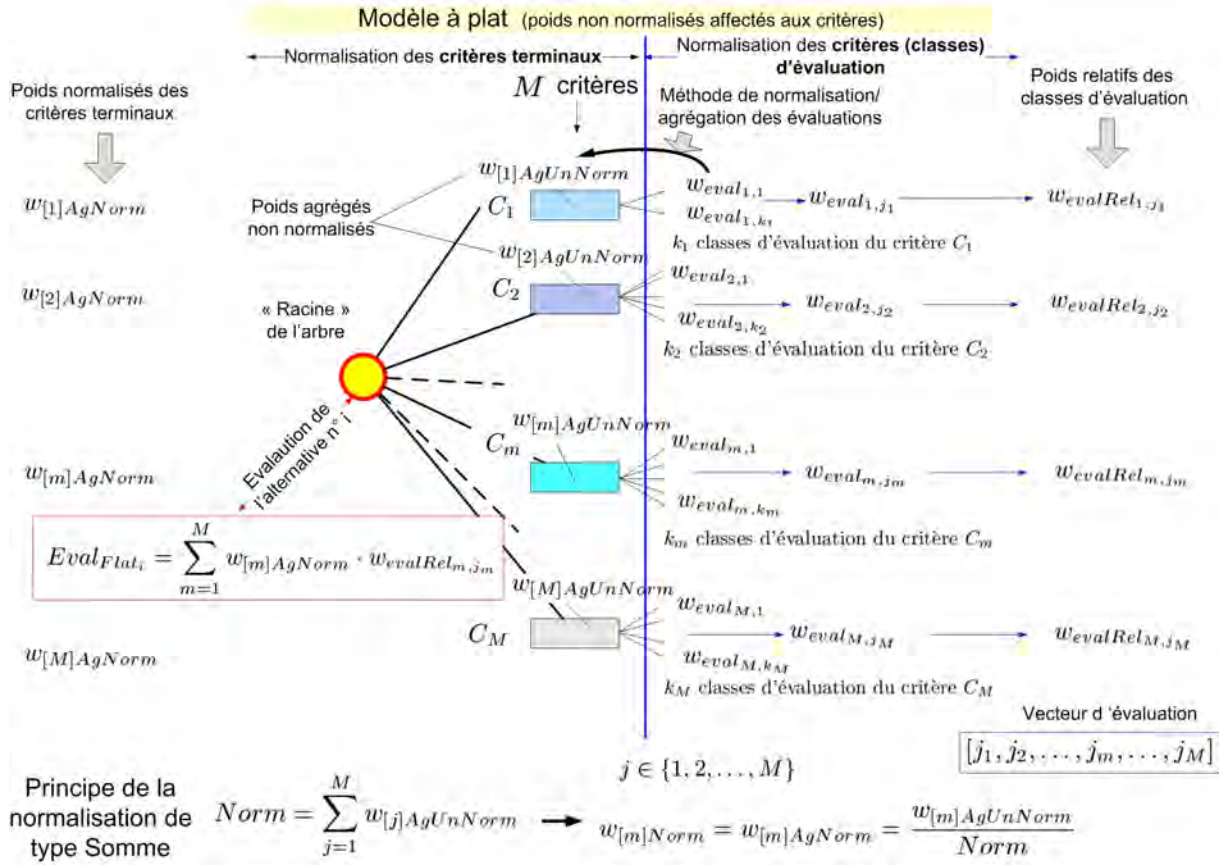


FIGURE 7.22 – Première étape : choix et mise en œuvre d'un principe de normalisation sur un modèle "à plat"

Reconfiguration d'un modèle à plat en une structure hiérarchique

On souhaite reconfigurer le modèle "à plat" sous une forme hiérarchique en créant deux critères intermédiaires C_{rec1} et C_{rec2} . C_{rec1} regroupe les m premiers critères terminaux du modèle à plat et C_{rec2} regroupe les $M - m$ derniers critères terminaux (FIG. 7.23). Pour chaque critère, le poids agrégé non normalisé du critère terminal $C_{[m]}$ est égal à $w_{[m]AgUnNorm} = \sum_{j=1}^{k_m} w_{Evalm,j}$ avec k_m le nombre de classes d'évaluation du critère $C_{[m]}$. Le poids normalisé du critère $C_{[m]}$ est égal à $w_{[m]Norm} = \frac{w_{[m]AgUnNorm}}{Norm}$ avec $Norm = \sum_{j=1}^M w_{[j]AgUnNorm}$. On définit $w_{[rec1]AgUnNorm} = \sum_{j=1}^m w_{[j]Norm}$ et $w_{[rec2]AgUnNorm} = \sum_{j=m+1}^M w_{[j]Norm}$. Chacun des critères étant devenu un sous-critère du critère C_{rec1} est normalisé par $w_{[m_{rec1}]}Norm = \frac{w_{[m]Norm}}{w_{[rec1]AgUnNorm}}$. Chacun des critères étant devenu un sous-critère du critère C_{rec2} est normalisé par $w_{[m_{rec2}]}Norm = \frac{w_{[j]Norm}}{w_{[rec2]AgUnNorm}}$.

Le principe essentiel consiste à raisonner et agréger des poids normalisés. Dans le modèle à plat, la part agrégée allouée au critère C_m est $w_{[m]Norm}$. Dans le modèle reconfiguré, elle est égale à $w_{[rec1]AgUnNorm} \cdot w_{[m_{rec1}]}Norm = w_{[rec1]AgUnNorm} \cdot \frac{w_{[m]Norm}}{w_{[rec1]AgUnNorm}}$. On retrouve $w_{[m]Norm}$ qui est le poids normalisé agrégé du modèle à plat (FIG. 7.23).

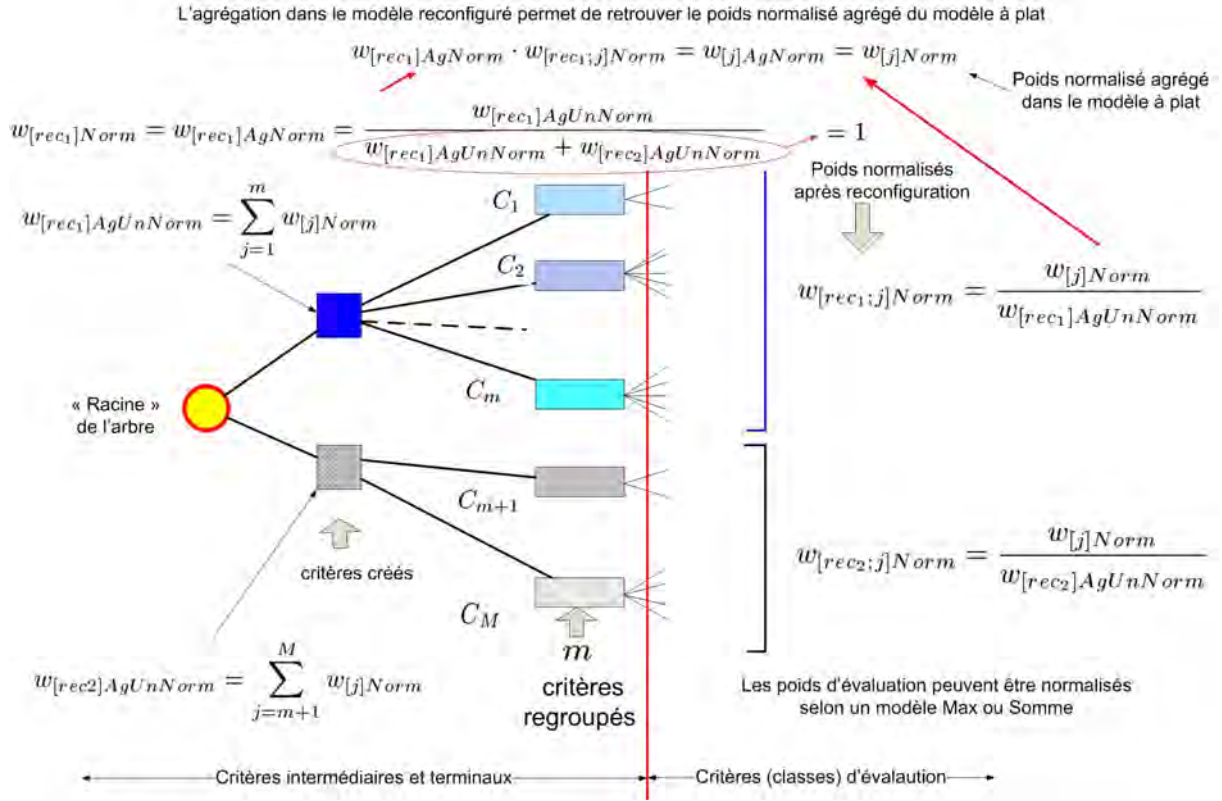


FIGURE 7.23 – Deuxième étape : reconfiguration et calcul des poids normalisés agrégés dans le modèle hiérarchique

Exemple simplifié

Définition du modèle à plat initial. Un exemple simple ci-dessous illustre le principe de la reconfiguration hiérarchique. Le modèle de départ correspond à un modèle à plat que l'on reconfigure vers deux modèles hiérarchiques notés *A* et *B*. Le modèle "à plat" de départ comprend six critères qui sont évalués par des poids absolus ou scores (FIG. 7.24). La méthode de normalisation utilisée est la méthode *SommeMaximum* (*SM*). Comme la structure n'a qu'un niveau à ce stade, les poids normalisés ($w_{[i]Norm}$) équivalent à des poids relatifs et à des poids agrégés.

Reconfiguration dans un premier modèle noté A. Le modèle à plat est reconfiguré dans le modèle de type A (notation purement indicative dans cet exemple) dans lequel on crée trois critères intermédiaires regroupant respectivement les critères 1 et 2, 3 et 4 et enfin 5 et 6. L'objectif est de recalculer les poids relatifs de chaque critère de manière à ce que les poids agrégés soient les mêmes que dans le modèle initial à plat. Le principe du calcul consiste à effectuer une normalisation en utilisant les poids normalisés du modèle à plat (FIG. 7.26).

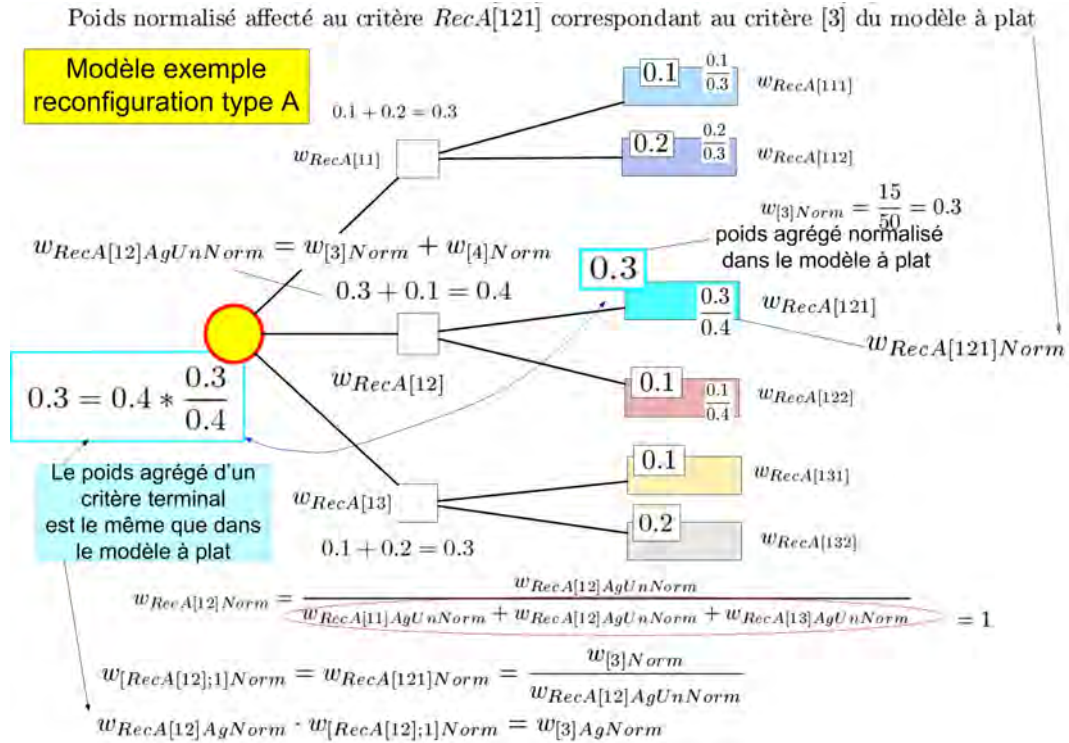


FIGURE 7.26 – Modèle "à plat" reconfiguré dans la structure hiérarchique A

Par exemple, pour le critère n°3, le poids relatif du nouveau critère créé noté $RecA[12]$ est égal à 0.4, et le poids relatif du critère terminal noté $RecA[121]$ est égal à $\frac{0.3}{0.4}$. On vérifie que le poids agrégé obtenu par produit est bien égal à 0.3 correspondant au poids normalisé du critère n°3 dans le modèle à plat : le résultat d'une évaluation dans le modèle à plat et ce modèle donnera le même résultat. Par contre, les poids relatifs des nouveaux critères $RecA[11]$, $RecA[12]$ et $RecA[13]$ permettent de les comparer et d'analyser la structure de préférence leur correspondant. Comment est-ce que chaque critère est préféré aux deux autres ? Est-ce que cette structure de préférence est logique et correspond à l'avis initial de l'analyste ? Cette reconfiguration est donc un moyen de valider un modèle de décision hiérarchique en confrontant des points de vue. Cette comparaison est plus facile sur trois critères que sur les 6 critères initiaux : c'est la force et l'intérêt de l'approche analytique.

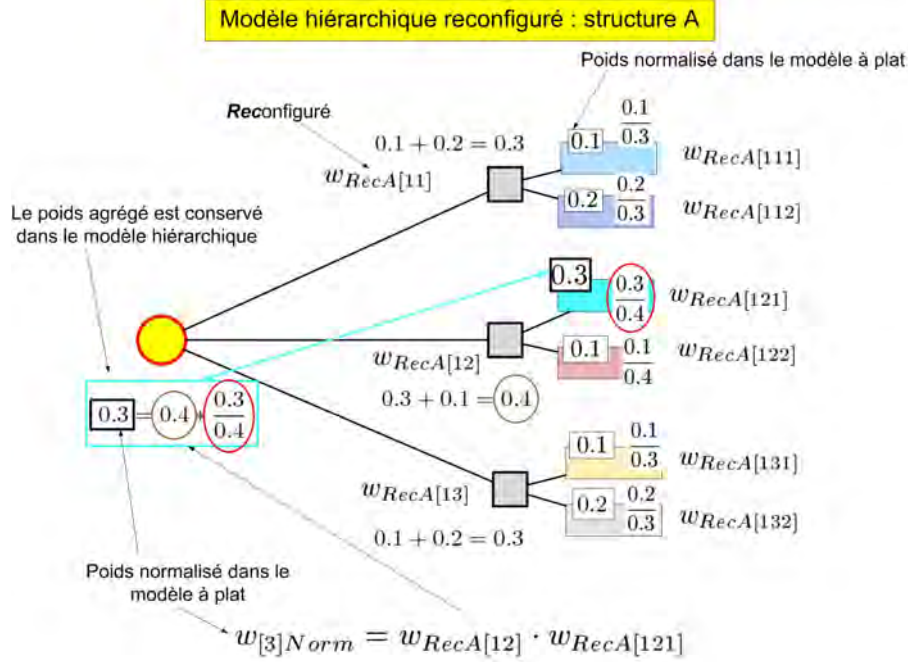


FIGURE 7.27 – Modèle "à plat" reconfiguré dans la structure hiérarchique A : exemple d'application numérique

Reconfiguration dans un second modèle noté B. Le dernier exemple de type B correspond au même principe avec un niveau hiérarchique supplémentaire. Toujours pour le critère n°3, on vérifie que le poids agrégé correspond bien au poids normalisé du critère (FIG. 7.28).

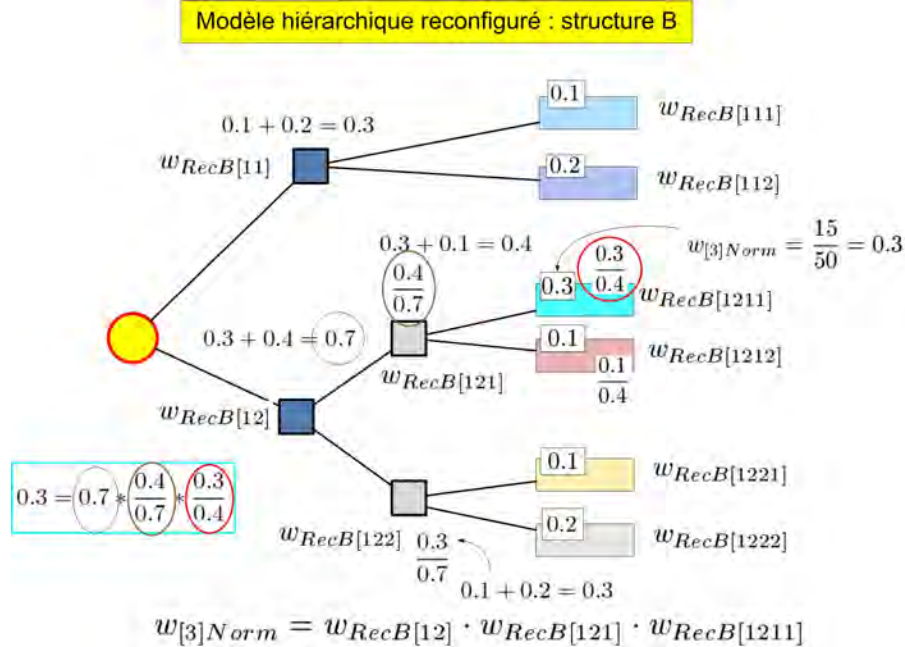


FIGURE 7.28 – Modèle "à plat" reconfiguré dans la structure hiérarchique B : exemple d'application numérique

Ce principe de reconfiguration associé à des règles de normalisation adaptées à la structure parfois "non-conventionnelle" des méthodes existantes permet d'assurer une polyvalence entre

les modèles et de rétro-analyser des modèles existants. Il est mis en œuvre dans le cadre de la structure du modèle "Sites Sensibles Avalanches". Le calcul ne comporte aucune difficulté mais nécessite une structuration correcte et explicite des données pour être codé de manière informatique²¹.

7.3 Applications

L'application concerne le modèle "Sites Sensibles Avalanches" qui ne peut être représenté de manière complète. L'ensemble de la structure hiérarchique et une reconfiguration sous forme de scénarios sont décrites en annexe H, p. 379. Les résultats ci-dessous ne sont donc que des extraits partiels appliqués à quelques critères pour présenter :



- le principe de la structuration et de la reconfiguration hiérarchiques ;
- le diagnostic de structures de préférences.

7.3.1 Structuration et reconfiguration hiérarchiques

Passage à la structure hiérarchique L'exemple traité concerne le critère "Occupants hivernaux" qui est analysé selon un nombre d'habitants présents dans une emprise historique (scénario nominal) et dans des emprises "aggravées" correspondant à des augmentations successives de la surface de la zone potentiellement concernée par l'avalanche (FIG. 7.29). Le principe est de pouvoir identifier les zones où le dépassement de limites successives ferait augmenter un peu, beaucoup ou pas du tout le niveau de vulnérabilité humaine observé dans l'emprise nominale : cette prise en compte de l'aggravation correspond ici à une forme de prise en compte de l'incertitude sans que le dépassement ne soit quantifié en termes de fréquences sous aucune forme que ce soit. Savoir que le niveau de risque peut éventuellement basculer rapidement d'un niveau à un autre est en effet un facteur de décision important. Chacun des critères est évalué selon des "scores", représentant l'utilité du critère pour le décideur dans la détermination du niveau de sensibilité du site vis-à-vis d'un risque. On considère à titre d'exemple deux sites test n°1 et n°2 qui ne diffèrent dans leur évaluation globale que dans la répartition des "scores" relatifs au critère "*Habitants- occupants hivernaux*".

21. d'où des notations parfois un peu lourdes dont le lecteur voudra bien nous excuser

CHAPITRE 7. DIAGNOSTIC ET RECONFIGURATION DE MODÈLES DE DÉCISION HIÉRARCHIQUE

République Française
 MANUEL pour le conseil départemental

Version V.1
 97-02

Fiche d'utilisation Vulnérabilité

Enquête : Date :

Auteur :

Identification du couloir : Commune :

Site :

Site

Test 1

Site

Test 2

Tableau 2 : Définition des différents critères et des scores du groupe « Vulnérabilité »

Critère Vulnérabilité	Élément par rapport à l'emprise du passé	Classe	"Score"	
			possible	retenu (0 car défaut)
Habitants : Nombre d'occupants hivernaux (ou de logements occupés l'hiver x 4)	1.1.1 à l'intérieur de cette emprise	> 20	36	24
		de 5 à 20	24	
		1 à 4	12	
	dans le prolongement topographique de l'emprise, vis-à-vis de la longueur totale de l'avalanche, à une distance comprise (en projection horizontale) entre :	1.1.2 0 et 5%	> 20	8
			de 5 à 20	
			1 à 4	
		1.1.3 5 et 10%	> 20	4
			de 5 à 20	
			1 à 4	
	1.1.4 10 et 20%	> 20	10	
		de 5 à 20	5	
		1 à 4	3	

La structure globale de préférence et le mode de formulation

s'apparente à un modèle analytique hiérarchique non exhibé

Les scores sont les formes empiriques des utilités dans un modèle d'agrégation additive

FIGURE 7.29 – Description du critère habitants - occupants hivernaux : extrait du manuel de la méthode "Sites Sensibles Avalanches"

Dans la version originale, les critères sont définis au même niveau dans une structure dite "à plat". On observe cependant dans la présentation de la méthode qu'une logique analytique non exprimée a conduit les concepteurs à regrouper les critères par thèmes. La structuration hiérarchique consiste d'une part à créer de véritables critères de regroupement et, d'autre part, à déterminer leurs pondérations respectives. A partir de la description de la méthode, en supprimant les liens conditionnels existants entre certains critères, une première structure hiérarchique est proposée (FIG. 7.30).

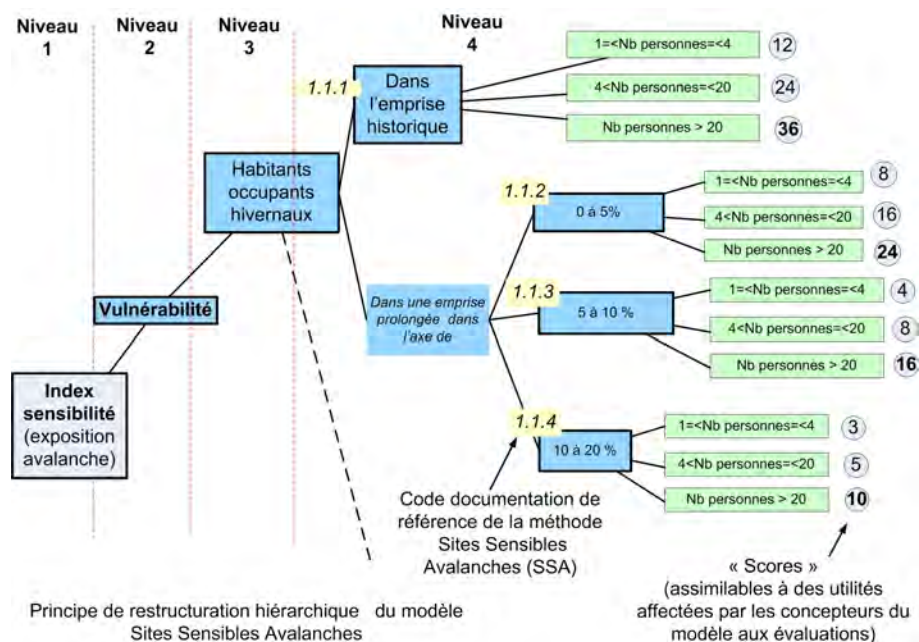


FIGURE 7.30 – Structuration hiérarchique de la méthode "Sites Sensibles Avalanches" : exemple du critère habitants - occupants hivernaux

Cette structure est ensuite reconfigurée pour faire apparaître des regroupements de critères correspondant à la notion de scénarios avec par exemple un scénario nominal et un scénario aggravé, correspondant à une emprise longitudinale de l'avalanche augmentée de 0 à 5% (FIG. 7.31).

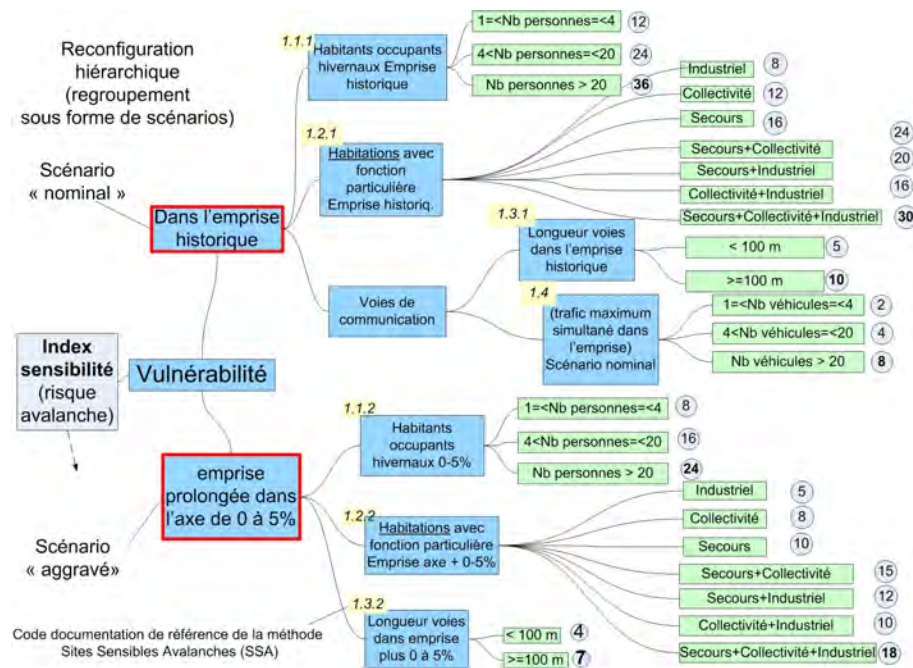


FIGURE 7.31 – Reconfiguration hiérarchique de la méthode "Sites Sensibles Avalanches" et explicitation de scénarios

Évaluation des alternatives L'évaluation des alternatives (les sites) est faite selon le principe de la méthode hiérarchique multicritères (*AHP*) en agréant les poids relatifs de la racine vers les critères terminaux. L'évaluation des critères est réalisée sur des classes pré-définies exclusives les unes des autres. Dans le modèle critère-estimateur-solution, l'évaluation de chaque site est caractérisée par un vecteur colonne (FIG. 7.32) indiquant, pour chaque critère terminal, la classe d'évaluation (le "score") retenu(e). L'évaluation peut évidemment être analysée de manière partielle pour comparer, par exemple, des sites uniquement en fonction de leur morphologie, de leur vulnérabilité exploitant une des caractéristiques et atouts des méthodes d'agrégation totale.

Les poids agrégés normalisés des classes d'évaluation ("scores") sont calculés à partir des poids normalisés des critères terminaux (selon les deux modèles de normalisation) et du poids relatif de la classe d'évaluation. Pour le site test n°2, on obtient donc un poids agrégé normalisé égal à 0.0157 avec le modèle *SommeMaximum* et un poids de 0.0133 avec le modèle *Somme* (FIG. 7.34). Le calcul est effectué selon le même principe sur l'ensemble des critères.

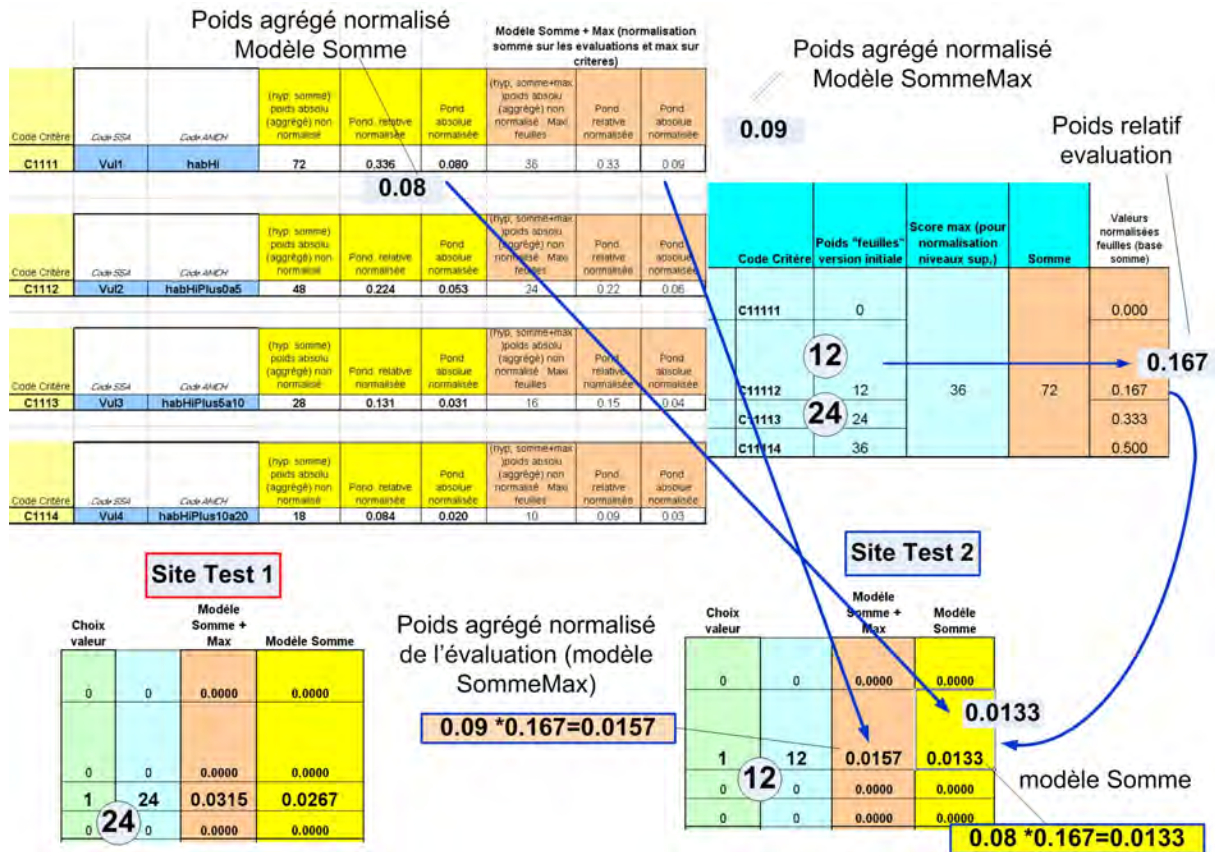


FIGURE 7.34 – Détail du calcul des poids agrégés normalisés pour le critère habitants occupants hivernaux

7.3.2 Diagnostic des structures de préférences

La structuration et la reconfiguration hiérarchique permettent un regroupement thématique des critères et une première explicitation du raisonnement. Les méthodes de normalisation permettent, quant à elles, d'exprimer des poids relatifs et de proposer des analyses des préférences telles qu'elles ont été choisies par les concepteurs du modèle. Cette analyse est effectuée à titre d'exemple sur notre critère test "Habitants- Occupants hivernaux" et aussi sur les quatre critères principaux que sont la vulnérabilité, la morphologie, la nivo-climatologie et l'histoire. Le principe est de comparer les poids du modèle existant avec des poids issus de l'expression des préférences à l'aide de comparaison par paires (méthode de *Saaty*, *AHP*).

Cas du critère *Habitants - Occupants hivernaux* Les préférences mises en évidence correspondant aux poids résultant de la structuration correspondent à un modèle linéaire. Les préférences relatives permettant de s'approcher de ce modèle correspondent en fait à de faibles différences d'importance relative : la classe plus de 20 habitants (critère 3) est seulement un peu plus importante que la classe 1 à 4 habitants (FIG. 7.35). Est-ce que c'est vraiment ce que les concepteurs voulaient choisir comme gradation entre les critères ? Cette analyse permet

CHAPITRE 7. DIAGNOSTIC ET RECONFIGURATION DE MODÈLES DE DÉCISION HIÉRARCHIQUE

au moins de poser la question et le cas échéant d'améliorer le modèle. D'autres combinaisons permettraient d'obtenir les bonnes valeurs numériques mais sans respecter la règle relative à la cohérence globale.

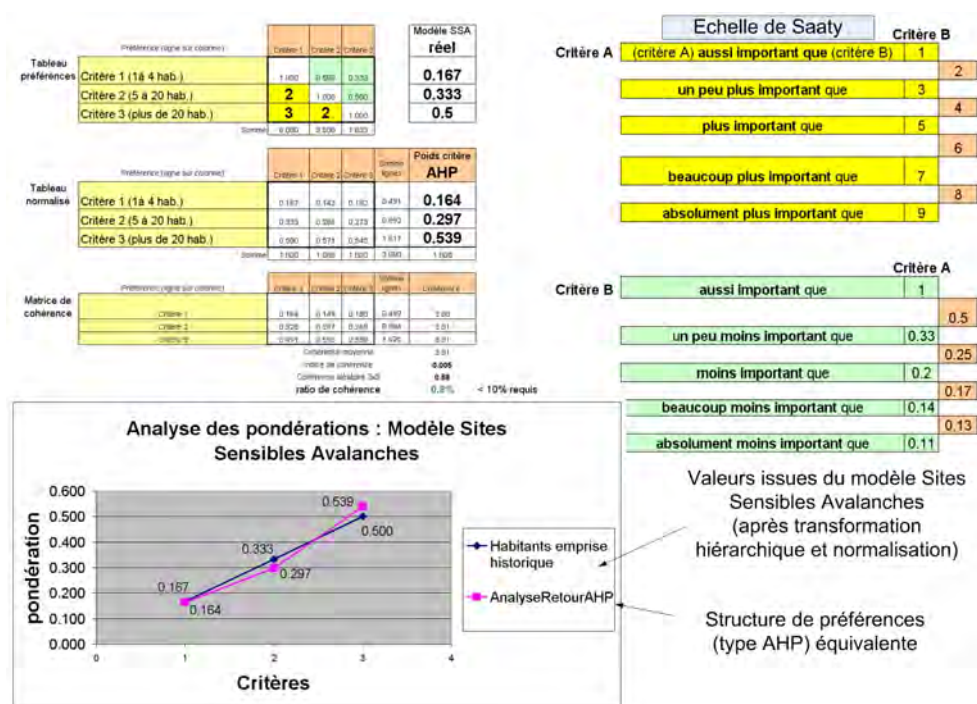
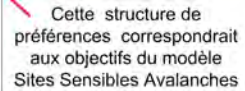


FIGURE 7.35 – Détail du calcul des poids agrégés normalisés pour le critère habitants occupants hivernaux

Cas des critères principaux L'analyse porte maintenant sur les poids relatifs des critères vulnérabilité, morphologie, histoire et nivo-climatologie que les concepteurs avaient souhaité respectivement égaux à 50, 25, 15 et 10%. Si on considérait un critère aléa regroupant la morphologie, l'histoire et la nivo-climatologie, l'aléa et la vulnérabilité seraient évidemment équivalents. La structure de préférences correspondant à la répartition entre les quatre critères peut être identifiée (FIG. 7.36). Le critère vulnérabilité est ainsi seulement un peu plus important que la morphologie. Une analyse du même type pourrait être faite entre les critères décrivant l'aléa. Il est donc possible de vérifier les structures de préférences dans des regroupements quelconques, à condition évidemment qu'ils aient un sens d'un point de vue thématique.



CHAPITRE 7. DIAGNOSTIC ET RECONFIGURATION DE MODÈLES DE DÉCISION HIÉRARCHIQUE

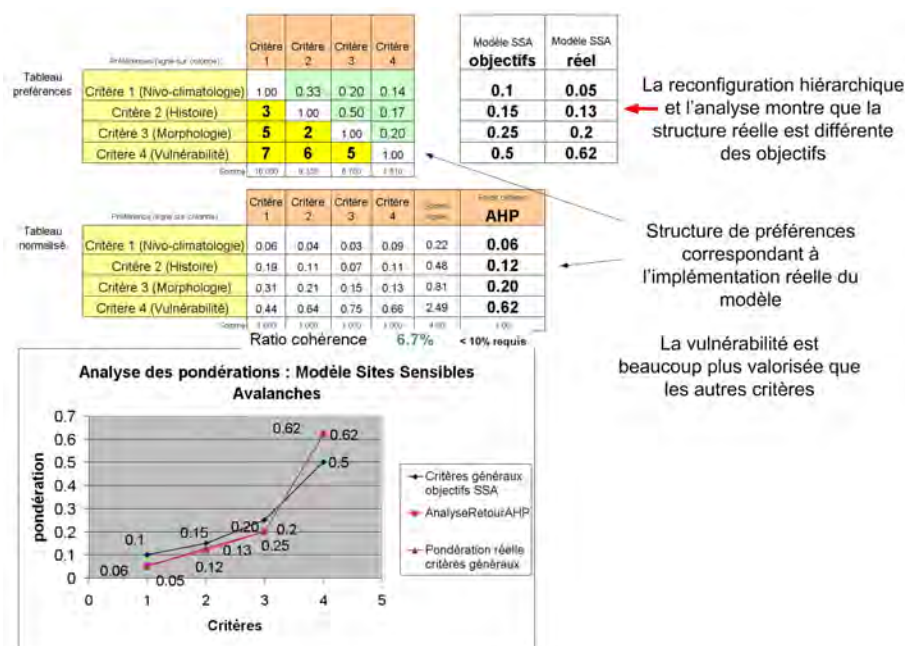


FIGURE 7.37 – Analyse en retour des préférences entre critères principaux de la méthode "Sites Sensibles Avalanches" : comparaison avec le modèle réel

7.4 Synthèse

Des méthodes de normalisation pour le diagnostic La reconfiguration hiérarchique d'un modèle exploite et propose des modes de transition entre un modèle "à plat" et différentes structures hiérarchiques. Elle s'appuie notamment sur des méthodes de normalisation et d'agrégation spécifiques adaptées au modèle *critère-estimateur-solution* utilisé dans le cadre d'évaluations non simultanées d'un grand nombre d'alternatives (comme dans le cas d'un inventaire, d'une classification de portée nationale). L'évaluation est différente du modèle hiérarchique de type *AHP*. En effet, dans le modèle classique *AHP*, les alternatives sont évaluées selon le même principe que les autres critères de la hiérarchie. Les nombres de classes d'évaluations sont donc toujours les mêmes pour tous les critères terminaux. Dans un modèle de type "*critère-estimateur-solution*", les nombres de classes d'évaluation peuvent être différents d'un critère à l'autre ou d'un modèle à l'autre²². Les méthodes de normalisation basées sur la somme montrent leurs limites : le poids relatif de chaque classe d'évaluation décroît en effet quand le nombre de classes augmente dans un modèle de normalisation de type somme. A noter que ce type de problème est rencontré dans l'approche proposée par Beynon (2002) dans le cadre d'un modèle associant l'*AHP* et la théorie des fonctions de croyances. Pour des critères terminaux comportant un grand nombre de classes d'évaluation, le poids relatif obtenu par une méthode de normalisation basée sur la somme sera donc très faible. Au final, d'un point de vue purement numérique, la différence d'évaluation existera mais sera très faible. Dans ce cas, l'analyste saura que les résultats doivent être interprétés mais le décideur aura une vision faussée par le chiffre brut. Les résultats peuvent donc s'avérer contre intuitifs et pénaliser des critères terminaux importants mais comportant un grand nombre de classes d'évaluation. Pour pallier cet inconvénient, le recours à des méthodes de normalisation basées sur le maximum est nécessaire. Elles prennent en compte les exclusivités entre critères et permettent d'obtenir des résultats plus intuitifs et compatibles avec des structures hiérarchiques quelconques (non équilibrées).

22. voir par exemple modèles exemples 1 et 2, critère *infrastructures* en annexes G.2 et G.3, p. 371 et p. 371

La validité des méthodes d'agrégation doit être discutée Toutes les méthodes d'agrégation ne permettent pas de représenter n'importe quelle structure globale de préférences du décideur (soit la façon dont il va interpréter les évaluations, préférer une alternative à une autre) comme l'a montré un exemple simple concernant l'utilité additive. La méthode "*addition*" du modèle Sites Sensibles Avalanches doit donc être considérée avec prudence : les phénomènes de compensation sont avérés. La méthode d'agrégation associée à la version originale de l'analyse multicritères hiérarchique (*AHP*) est également concernée avec une nuance. L'introduction d'une méthode de normalisation différente au niveau des évaluations et des critères intermédiaires (méthode de normalisation *SommeMaximum*) permet de discriminer des alternatives qui ne le sont pas dans le cadre de la méthode additive basique. Les méthodes d'agrégation mixte doivent donc être privilégiées.

Le diagnostic d'un modèle existant permet d'explicitier un raisonnement. Le diagnostic d'un modèle empirique existant tel que le modèle *Sites Sensibles Avalanches (SSA)*²³ permet de le rattacher à une classe de modèles d'aide multicritères à la décision basés sur des principes d'agrégation totale. Ce constat permet de replacer dans un cadre plus rigoureux les scores, poids manipulés de façon empirique par les concepteurs du modèle. Les scores ou poids absolus doivent être considérés comme des utilités traduisant la structure de préférence globale du décideur (par exemple, la détermination d'un niveau de sensibilité au risque sur la base de critères liés à l'aléa, la vulnérabilité). Grâce à la transformation sous forme hiérarchique, on peut mettre en évidence des différences entre les mêmes classes qualitatives servant pour l'évaluation de plusieurs critères et analyser de manière plus synthétique la cohérence des jugements : si on constate des différences, il n'est cependant pas possible de conclure et dire s'il s'agit d'erreurs ou d'une volonté affirmée des concepteurs du modèle.

En se basant sur les principes de la méthode proposée dans le cadre de l'*AHP* et grâce à la décomposition hiérarchique, il est possible non seulement d'explicitier mais aussi de rétro-analyser des structures de préférences entre critères. Il n'y a pas, ici non plus, de relation bijective entre une série de niveaux de comparaison choisis dans l'échelle qualitative de *Saaty* et la structure réelle de préférence exprimée par les poids. Cette rétro-analyse permet par contre d'exhiber des niveaux d'importance relative compatibles avec les poids retenus : c'est donc une façon opérationnelle pour d'une part explicitier un raisonnement dont on n'a plus de traces et, d'autre part proposer à la discussion les principes identifiés.

Au final, la méthodologie de diagnostic basée sur la transformation hiérarchique d'un modèle à plat, l'utilisation de méthodes de normalisation spécifiques et la confrontation avec une rétro-analyse des structures de préférences permet d'explicitier des hypothèses de conception et d'en valider ou infirmer les principes pour améliorer le modèle. Cette approche qui s'intéresse à la structure et aux principes même du modèle d'aide à la décision est une étape indispensable et complémentaire d'une analyse de sensibilité des résultats dont nous n'avons pas ici développé les principes.

La reconfiguration permet une polyvalence des décisions. En regroupant les critères par niveau, la structuration hiérarchique permet à partir d'un modèle à plat, d'effectuer des comparaisons et de valider les hypothèses relatives aux préférences entre les critères de base. Les critères regroupés et normalisés peuvent être utilisés dans d'autres contextes et structures de décision utilisant les mêmes principes de normalisation autorisant ainsi la mutualisation et la capitalisation d'analyses imbriquées les unes dans les autres. C'est ici un atout des méthodes analytiques et de leur proximité avec des approches systémiques. La reconfiguration hiérarchique permet quant à elle de comparer des modes de classement de critères alternatifs. Est-ce que, sur

23. voir 2.3.3, p. 44

la base des mêmes utilités, mais dans une autre présentation des critères, les structures de préférences sont cohérentes avec les idées du décideur ? Dans le cadre de l'étude des risques naturels, cette possibilité permet d'envisager une représentation sous forme de différents scénarios correspondant à des situations plus ou moins aggravées. Elle permet, par exemple, d'analyser les conséquences d'aggravation sur un critère puis dans un second temps de regrouper ces scénarios d'aggravation envisagés initialement au niveau de chaque critère de manière isolée et de comparer les préférences dans ces deux configurations. Ces approches basées sur des scénarios ne sont cependant pas des modèles de décision en univers risqué ou incertain.

La problématique globale reste partiellement traitée. L'aide multicritères hiérarchique permet de structurer et formuler un problème de décision selon une démarche analytique. En ce sens, les problématiques d'expertise peuvent être décrites par ces méthodes, garantissant une traçabilité en explicitant les critères utilisés pour le raisonnement. Les approches de diagnostic permettent a posteriori de proposer des interprétations de modèles existants et de comparer différentes formulations d'un même problème. Il demeure également une difficulté liée à la correspondance entre l'évaluation des critères et la structure de préférence du décideur. Toutes les méthodes d'agrégation totale reposent sur l'agrégation de fonctions d'utilité dont la détermination reste somme toute assez mystérieuse. Chaque critère est évalué de manière implicite en terme de préférence par rapport à la décision globale. Dans la forme, les loteries de la théorie de l'utilité multi-attribut (*MAUT*) sont critiquées et peu explicites pour traduire les préférences réelles du décideur. La méthode de comparaison par paires est facile à mettre en œuvre mais ne porte que sur des classes qualitatives pré-définies. Pour un critère de vulnérabilité, un nombre de personnes compris supérieur à 20 est certes plus sensible qu'un nombre entre 5 et 20 mais pour un nombre égal à 19, il serait naturel de commencer à penser qu'on entre dans une zone de "sensibilité". Dans le même temps, l'évaluation du nombre peut être imprécise et recouvrir deux classes, laquelle va t'on choisir ? Il faut donc conserver l'estimation de base et dissocier l'évaluation du critère et son "*utilisation*" (au sens d'une affectation à une classe et sa transcription en terme d'utilité telle que définie dans les modèles de décision). La même information peut servir dans plusieurs contextes de décision mais son imperfection est indépendante des contextes d'utilisation. Il faut donc considérer l'imperfection de l'information exploitée pour analyser les alternatives et l'hétérogénéité des sources qui n'est pas traitée dans les modèles hiérarchiques. L'objectif est donc maintenant ici de proposer une méthodologie associant la fusion d'information et la formulation hiérarchique d'un problème de décision avec les enjeux suivants :

- expliciter l'imperfection de l'évaluation des critères ;
- prendre en compte et combiner les sources hétérogènes ;
- dissocier l'évaluation du critère et l'interprétation en termes de décision.

Chapitre 8

La méthodologie (*ER-MCDA*) : analyse multicritères et fusion d'information

Introduction

La prise en compte de l'imperfection de l'information en général et de l'incertitude dans un processus de décision peut être envisagée de deux manières principales.

La première approche classique et historique consiste à fournir des éléments d'aide à la décision en considérant le caractère incertain ou risqué des conséquences des actes correspondant aux alternatives envisagées. Elle est basée sur la théorie de la décision et s'envisage dans un contexte d'avenir risqué (probabilités connues ou "objectives") ou incertain (probabilités subjectives). Les résultats correspondent à des conséquences probabilisées évaluées selon un critère unique exprimant le niveau de gain ou de perte associé à chacune des décisions évaluées. Les méthodes d'aide multicritères à la décision constituent quant à elle une classe de méthodes qui intègrent les préférences des décideurs et autorisent l'agrégation de critères différents. Dans le cadre de ces méthodes, les méthodes de sur-classement permettent d'introduire de l'incertitude et de l'imprécision au niveau des préférences exprimées par les décideurs (notions de préférences faibles ou fortes). Le caractère flou ou l'imprécision dans les évaluations des critères ne sont pas pris en compte.

La seconde approche consiste à prendre en compte la qualité (ou véracité) de l'information dans le processus de décision : comment peut-on choisir la meilleure valeur attachée à une information quand celle-ci provient de multiples sources, plus ou moins fiables, émettant des évaluations parfois conflictuelles (paradoxales) sur les mêmes grandeurs ou entités ? Cette problématique se rattache au domaine de la fusion de données dans le cadre des théories de l'information. La fusion vise à choisir l'information la plus certaine en vue de l'utilisation ultérieure dans un processus de décision externe.

Les premiers chapitres ont décrit le contexte d'incertitude associé à l'expertise des risques naturels et proposent d'assimiler le processus d'expertise à un enchaînement de décisions basées sur des informations incertaines, imparfaites et conflictuelles. Ce chapitre décrit une approche associant une méthode d'aide multicritères à la décision et un processus de fusion d'information prenant en compte des évaluations imparfaites d'alternatives provenant de sources multiples potentiellement conflictuelles (Tacnet et al., 2009). Il ne s'agit pas ici de développer un modèle de décision dans le risque ou l'incertain. L'analyse des composantes d'un risque est considérée être un exemple de problème de décision et constitue le sujet d'application de la méthode. Le niveau d'exposition à un phénomène naturel, évalué de manière qualitative par rapport à des

catégories pré-définies (fort, moyen, faible), est un résultat de la méthode.

Ce chapitre décrit globalement les principes méthodologiques avant de détailler successivement ses principales phases correspondant à :

- la modélisation conjointe des problèmes de décision hiérarchique et de fusion ;
- la définition des modèles de transposition ("mapping") floue des critères quantitatifs ;
- la définition des modèles de transposition floue et d'évaluation ("scaling") des critères qualitatifs ;
- le choix de la procédure de fusion (ordre, règles ...)
- et, enfin, une proposition de méthode permettant de considérer non seulement l'imprécision, l'incertitude mais aussi l'importance dans le cadre d'un processus de fusion.

8.1 La méthodologie *ER-MCDA* : du modèle hiérarchique à l'évaluation des critères

La méthodologie dénommée *ER-MCDA*¹ envisage à la fois l'incertitude, l'imprécision et l'importance dans l'évaluation d'un modèle d'analyse multicritères. Elle associe l'analyse multicritères hiérarchique (*AHP*) (Saaty, 1982), la théorie des possibilités (Dubois and Prade, 1988), des ensembles flous (Zadeh, 1965) pour l'évaluation des critères et enfin la fusion d'information dans le cadre de la théorie des fonctions de croyance que nous assimilerons à un type de "raisonnement crédibiliste" (*ER*²). L'approche exploite particulièrement les liens établis entre les théories des possibilités et des fonctions de croyance (Dubois et al., 2000; Zadeh, 1978; Dubois et Prade, 2006) et propose de manière plus innovante un mode opératoire pour associer une approche d'aide multicritères hiérarchique et la fusion d'information.

Plusieurs alternatives, actions ou solutions sont évaluées par rapport aux préférences exprimées sur les critères identifiés dans le modèle hiérarchique. Dans notre problématique de décision, le modèle comprend des critères quantitatifs (concernant principalement des données physiques numériques) et des critères qualitatifs (traduisant l'appartenance à une classe). Les critères quantitatifs sont évalués de manière imprécise (sous forme d'intervalles) et incertaine (traduisant la confiance accordée à leur évaluation). Le nombre de sources est variable d'un critère à un autre. Ce modèle constitue un cadre polyvalent capable de considérer des sources plus ou moins fiables évaluant de nombreux critères quantitativement et qualitativement. Il vise notamment à prendre en compte non seulement l'incertitude et l'imprécision mais aussi l'importance dans l'évaluation des critères.

D'autres auteurs ont proposé d'associer la théorie des ensembles flous, le raisonnement crédibiliste (dans le cadre de la *DST* exclusivement) et les méthodes d'aide multicritères à la décision (Omriani et al., 2007). Leurs approches n'explicitent pas clairement les modèles permettant de faire le lien entre les critères et la décision. Dans notre approche, cet aspect est explicite au travers de modèles dits de *transposition* et d'*évaluation* : ils contribuent de manière essentielle à la traçabilité des raisonnements : par exemple, pour un expert donné, telle gamme de pente correspond potentiellement à telle classe d'évaluation du risque global. Au-delà de l'aspect calculatoire, cette étape apparaît comme essentielle car elle matérialise et encapsule l'approche experte du problème de décision pouvant être par exemple d'analyse d'un risque, d'une sensibilité

Le raisonnement crédibiliste est utilisé au travers des cadres des théories de *Dempster-Shafer* (*DST*), de *Dezert-Smarandache* (*DSmT*) et des règles de fusion associées pour évaluer et propager l'incertitude et l'imperfection des données dans le processus de décision. Les experts et les critères sont successivement considérés comme des sources dans les phases du processus de fusion. La démarche est conçue pour envisager différentes stratégies de fusion d'information

1. Evidential Reasoning - MultiCriteria Decision Analysis

2. Evidential Reasoning

8.1. LA MÉTHODOLOGIE *ER-MCDA* : DU MODÈLE HIÉRARCHIQUE À L'ÉVALUATION DES CRITÈRES

en termes d'ordre de fusion, de choix des règles utilisées. La méthodologie comprend les phases suivantes (FIG. 8.1) :

étape n°1 : Formulation du problème de décision fondée sur une analyse experte pour identifier les critères (quantitatifs, qualitatifs) et expliciter les priorités (ou préférences) entre critères dans le cadre d'une approche multicritères hiérarchique basée sur une approche *critère-estimateur-solution*. Cette étape permet de définir le cadre de discernement de décision commun sous forme d'un ensemble de classes $\{HD_1, \dots, HD_k, \dots, HD_{GD}\}$ ³ correspondant aux classes d'évaluation de la décision par exemple des niveaux de sensibilité {faible, moyen, fort}.

étapes n°2 et 3 : Définition des modèles de transposition et d'évaluation utilisés pour la fusion en considérant soit des hypothèses exhaustives et exclusives (modèle de *Dempster-Shafer*), soit des hypothèses non nécessairement exclusives (modèle de *Dezert-Smarandache*) :

- Spécification des modèles de *transposition* ("mapping") quantitative qui permettent d'exprimer les critères quantitatifs sous une forme compatible avec le cadre de discernement utilisé pour la fusion aboutissant à la décision (étape 3_{qt}). Ils établissent une correspondance entre des critères évalués par des sources plus ou moins fiables (α_s) sous forme d'intervalles numériques (étape 2_{qt}) et le cadre de discernement de décision (par exemple, une surface de 10 ha va correspondre à un niveau de sensibilité fort). Les jeux de masse de croyance $m(.)$ sont déduits des évaluations par les sources puis transposés ;
- Spécification des modèles de *transposition* ("mapping") qualitative (étape 3_{ql}) qui permettent de transformer l'évaluation de critères qualitatifs, exprimés sous forme d'appartenance à des classes, dans le cadre de discernement de décision global. Le type d'infrastructure exposée à un phénomène peut être un équipement industriel, un équipement de secours ou un équipement mixte. La présence d'un équipement de secours correspondra plutôt à une sensibilité forte. Cette appartenance à une classe est faite avec une confiance variable de la source (α_s) ;
- Spécification des modèles dit d'*évaluation* ("scaling") qualitative qui concernent uniquement les critères qualitatifs (étape 3_{ql}) et qui permettent de déterminer les jeux de masses de croyances ($m(.)$) affectées aux classes qualitatives. L'appartenance à ces classes qualitatives, qui peut être partielle et plus ou moins certaine, est synthétisée par une valeur de crédibilité (*Bel*) qui est utilisée dans les modèles de transposition qualitative.

étape n°4 : Les étapes précédentes permettent d'obtenir pour chaque source et pour chaque critère des jeux de masses de croyance exprimés dans le cadre de discernement commun de décision. Pour chaque critère quantitatif (étape 4_{qt}) et qualitatif (étape 4_{ql}), les jeux de masses de croyance exprimés par les sources et "transposés" dans le cadre de discernement commun sont fusionnés entre eux. On obtient finalement pour chaque critère, un jeu de masse de croyance défini dans le cadre de discernement de décision commun.

étape n°5 : La fusion des critères, considérés comme des sources plus ou moins importantes, permet finalement d'obtenir les masses de croyance affectées à chacune des classes d'évaluation du cadre de discernement de décision commun. Différentes méthodes peuvent être utilisées pour exploiter les résultats de la fusion (maximum de masse, de la crédibilité ...) pour choisir la classe qui sera retenue. La fusion permet de représenter la répartition entre les classes si toutes les sources ne sont pas concordantes et aussi l'incertitude de l'évaluation globale.

Ce principe global décrit le processus de fusion retenu en première approche. Il peut en exister d'autres nombreuses variantes. Il est ainsi possible de fusionner toutes les évaluations d'une même source (un expert) puis de fusionner les décisions des experts, de fusionner les critères entre eux dans des ordres différents. Ces variantes seront détaillées en 8.5.1 (p. 207).

3. notations issues de Yang and Xu (2002)

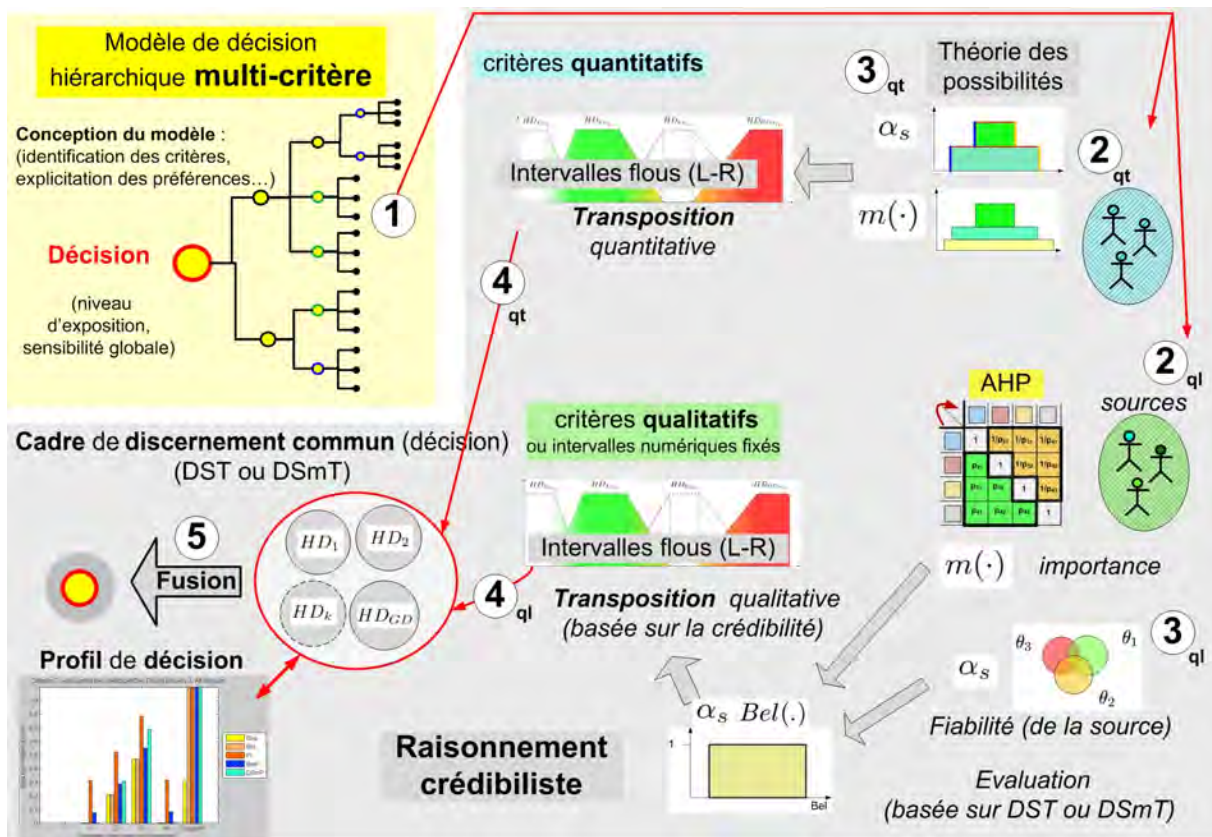


FIGURE 8.1 – La méthodologie *ER-MCDA* comprend 5 étapes principales

Les étapes de la méthodologie sont détaillées dans la suite en abordant successivement la définition du cadre de discernement de décision global, les modèles de transposition quantitatifs et qualitatifs et enfin le processus de fusion en distinguant deux niveaux de fusion : la fusion des sources d'évaluation des critères puis celle des critères considérés comme des sources (étape n°5).

8.2 La définition des modèles de décision et de fusion

Face à n'importe quel problème de décision, l'analyste commence obligatoirement par une phase de modélisation et de structuration qui constitue à la fois une partie essentielle, délicate (von Winterfeldt and Fasolo, 2009) mais aussi subjective (Saaty and Shih, 2009) de la méthodologie. Dans le cadre de l'approche *ER-MCDA*, la modélisation concerne à la fois le problème de décision et le processus de fusion (FIG. 8.2). Dans notre contexte, la modélisation cumule les difficultés connues dans le cadre des approches multicritères (Roy, 1985) et de la théorie des fonctions de croyance (Martin and Osswald, 2006). Une des méthodes les plus intuitives pour gérer la complexité d'un problème consiste bien souvent à le décomposer en sous-problèmes. Cette approche est utilisée dans le cadre de l'analyse multicritères hiérarchique (*AHP* développée par Saaty (1982)) mais aussi par exemple dans le cadre de modèles d'analyse de la fiabilité et de la sûreté de fonctionnement (Wang et al., 1996) ou dans tout modèle basé sur une approche systémique. Ces approches présentent de nombreuses similitudes. Forman and Selly (2002) considèrent ainsi que l'analyse hiérarchique est équivalente au classique arbre des causes ou diagramme *Ishikawa*. Divers formalismes supportent la démarche. Le langage *UML* (*Unified Modeling Language*) (Rumbaugh et al., 1999; Fowler, 2002) est utilisé pour décrire les éléments du problème de décision et de fusion tels que les diverses sources, les critères, les mé-

thodes. La structuration du problème est ensuite exploitée dans le cadre de l'implémentation informatique basée sur l'utilisation des routines de fusion (Martin, 2009).

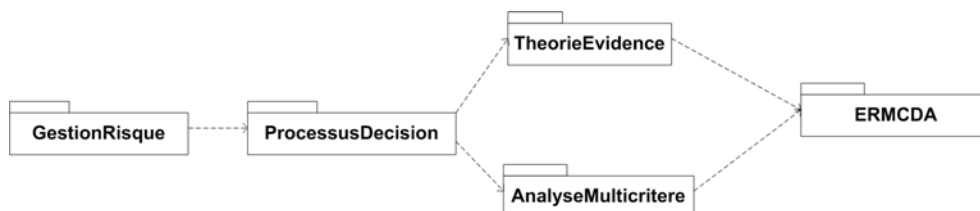


FIGURE 8.2 – Modélisation *UML* des packages principaux de l'approche *ER-MCDA*

8.2.1 Modèle de décision hiérarchique

Cette étape correspond à la définition du modèle de décision multicritères hiérarchique. Les critères sont identifiés et décomposés en sous-critères puis caractérisés en termes d'importance relative dans le cadre de l'approche classique de comparaison par paires utilisant l'échelle de Saaty. Nous suivons ici Saaty and Tran (2007) qui jugent inutile et déconseillent d'introduire une approche floue dans l'évaluation comparative des critères par le biais de matrices de comparaison : par hypothèse, la méthode de comparaison par paires correspond en effet par essence à une approche floue et subjective.

Les critères quantitatifs correspondent aux critères qui sont évalués directement par des grandeurs numériques pouvant prendre la forme d'une valeur discrète précise ou d'une série d'intervalles emboîtés. Les critères qualitatifs correspondent soit à des critères évalués par appartenance à une classe strictement qualitative (par exemple, le critère vulnérabilité de type infrastructures évalués par rapport aux classes équipements industriels, de secours, collectifs), soit par extension à un critère numérique évalué par rapport à des intervalles fixés.

Le modèle de décision multicritères hiérarchique est conçu de manière classique selon la méthodologie et les principes de codification définis plus haut. Sa représentation classique correspond à celle d'un arbre tel que présenté dans les précédents chapitres⁴. Nous présentons ici une représentation sous forme d'un diagramme *UML* d'un arbre hiérarchique (FIG. 8.3) exploitée dans le cadre de la mise en œuvre de la méthode. Dans la suite, nous reviendrons à une présentation plus classique (arborescente) du modèle de décision hiérarchique. Dans le cadre de la méthodologie *ER-MCDA*, le modèle, de type *critère-estimateur-solution*, correspond à une logique de rangement. La décision consiste à choisir un niveau d'évaluation pour une alternative ou une solution. Dans le cadre de la fusion, à l'exception de la détermination des poids, le modèle n'a qu'un rôle conceptuel : la fusion est en effet réalisée sur les critères considérés "à plat" (voir FIG. 7.20, p. 163).

4. voir 7.2.1, p. 150

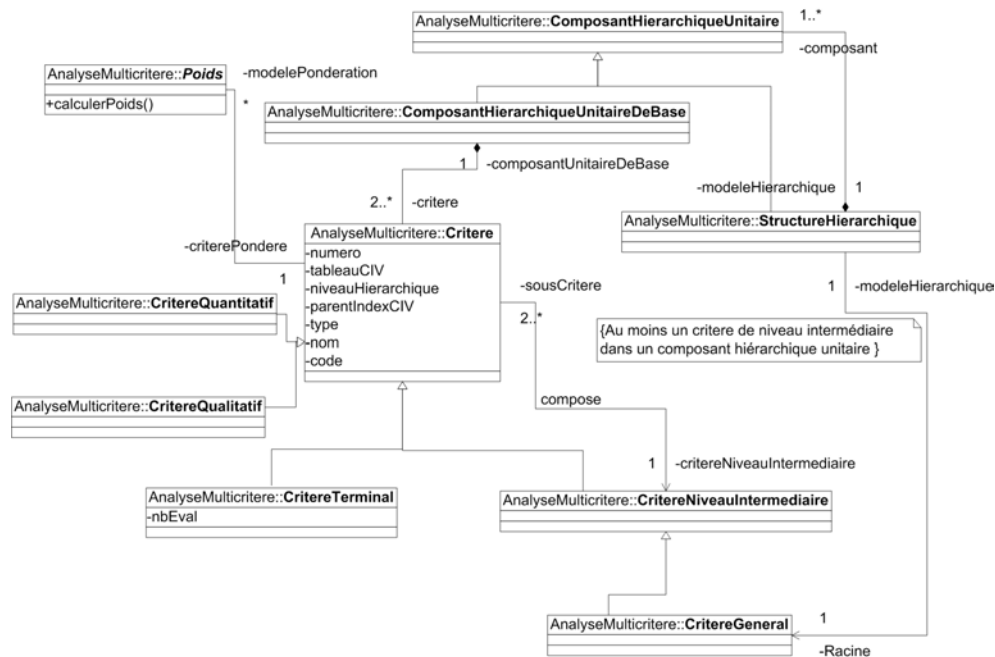


FIGURE 8.3 – Modélisation *UML* de la structure hiérarchique

8.2.2 Un cadre de discernement commun nécessaire pour la fusion

Le choix du cadre de discernement est une étape essentielle de la construction du modèle *ER-MCDA*. Le principe de la méthode *ER-MCDA* consiste en effet à établir un lien ("transposition") entre les évaluations réalisées sur chacun des critères quantitatifs et qualitatifs et le cadre de discernement de décision commun servant à fusionner des masses de croyance (FIG. 8.4).

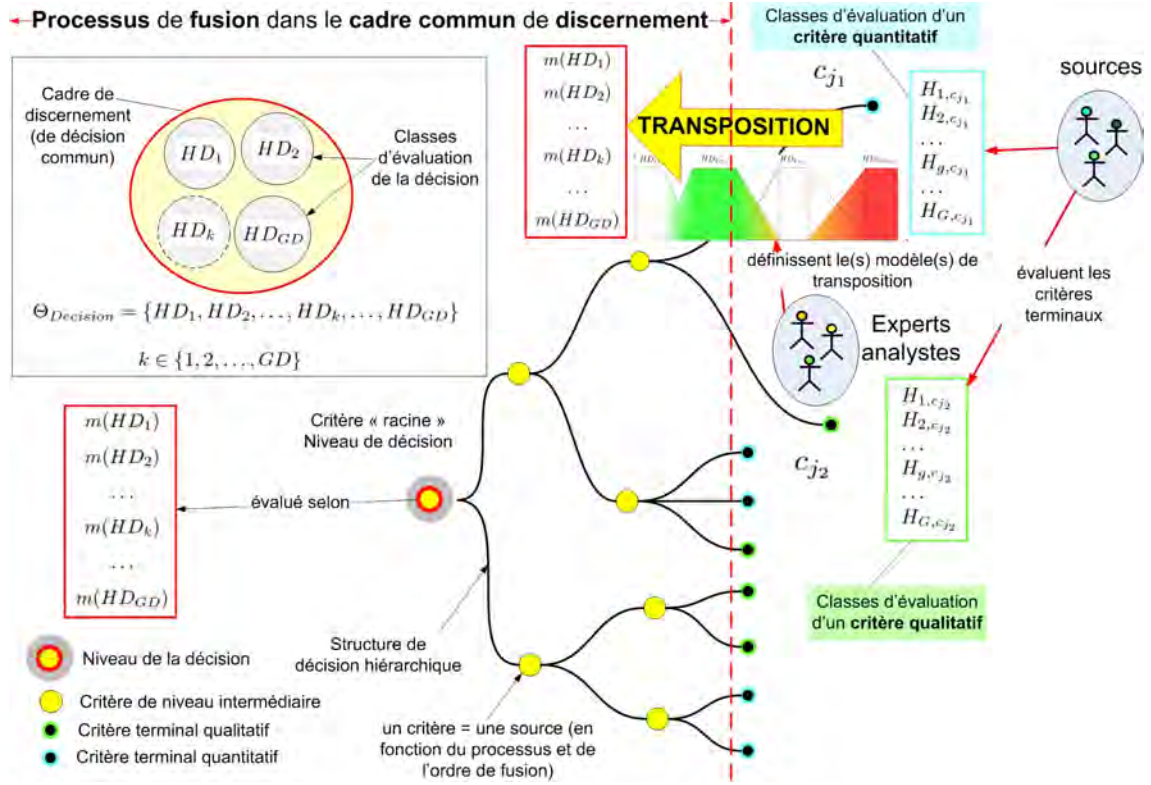


FIGURE 8.4 – Le cadre de discernement commun de décision est au centre de la méthodologie *ER-MCDA*

Le cadre de discernement constitue la "cible" dans laquelle les modèles de transposition injectent les masses de croyance issues de l'évaluation des critères quantitatifs et qualitatifs. La définition du cadre de discernement est étroitement liée à la nature de la décision pouvant concerner, dans notre contexte, aussi bien la définition du niveau d'exposition d'un site à des phénomènes naturels, le choix des zones à protéger en priorité, le niveau de confiance global dans une expertise. Le cadre de discernement peut être envisagé selon les deux cadres théoriques de la *DST* et de la *DSmT*. Dans le cadre d'un modèle basé sur la *DST*, les hypothèses (éléments du cadre de discernement) sont exhaustives et exclusives les unes des autres : les intersections entre les éléments (ou hypothèses) du cadre de discernement sont toutes vides. Dans le cadre de la *DSmT*, les intersections peuvent être non vides entre tous les éléments (cas du modèle libre *freeDSm*) ou partiellement vides (dans le cas d'un modèle *DSmH* dit "hybride"). Les intersections considérées comme vides par hypothèse constituent les contraintes d'intégrité du modèle (FIG. 8.5).

Le choix des éléments (ou hypothèses) du cadre de discernement, des contraintes et donc de la théorie utilisée sont des hypothèses de départ du modèle. Dans le cadre de la *DSmT*, le modèle peut représenter plus fidèlement une variation continue entre deux hypothèses. Le cadre de discernement $\Theta_{Decision}$ est l'ensemble des GD classes d'évaluation de la décision noté $\Theta_{Decision} = \{HD_1, HD_2, \dots, HD_k, \dots, HD_{GD}\}$ avec $k \in \{1, 2, \dots, GD\}$ ou HD_k représente une classe d'évaluation du problème de décision (critère "racine").

A titre d'exemple, nous utilisons le cadre général d'un problème de décision relatif à la détermination du niveau d'exposition d'un site à un phénomène naturel en fonction de critères liés à la morphologie, la climatologie, l'histoire et aux enjeux exposés. L'objectif est de déterminer à quelle classe d'exposition appartient le site mais aussi le niveau de confiance que l'on peut accorder au résultat en fonction des informations disponibles (précision, incertitude, incomplétude) et des conditions de construction de la décision (conflit, fiabilité des sources). Pour modéliser ce

même problème de décision, deux cadres de discernement Θ sont considérés :

- dans le cadre de la *DST* (FIG. 8.5), Θ est composé de 4 éléments exclusifs définis par $HD_1 =$ 'Pas de sensibilité', $HD_2 =$ 'Faible sensibilité', $HD_3 =$ 'Sensibilité modérée', $HD_4 =$ 'Forte sensibilité' ;
- dans le cadre de la *DSmT* (FIG. 8.5), Θ est composé de 3 éléments définis par $HD_1 =$ 'Pas de sensibilité', $HD_2 =$ 'Faible sensibilité', $HD_3 =$ 'Forte sensibilité' ;

Dans le modèle *DST*, l'hypothèse "sensibilité modérée" est donc définie par un élément n'ayant aucune intersection avec les autres éléments du cadre de discernement. Dans le modèle *DSm* hybride, seule l'intersection entre les hypothèses θ_1 et θ_3 est vide constituant une contrainte du modèle *DSm*. Les intersections entre θ_1 et θ_2 ainsi que celle entre θ_2, θ_3 sont non vides (FIG. 8.5).

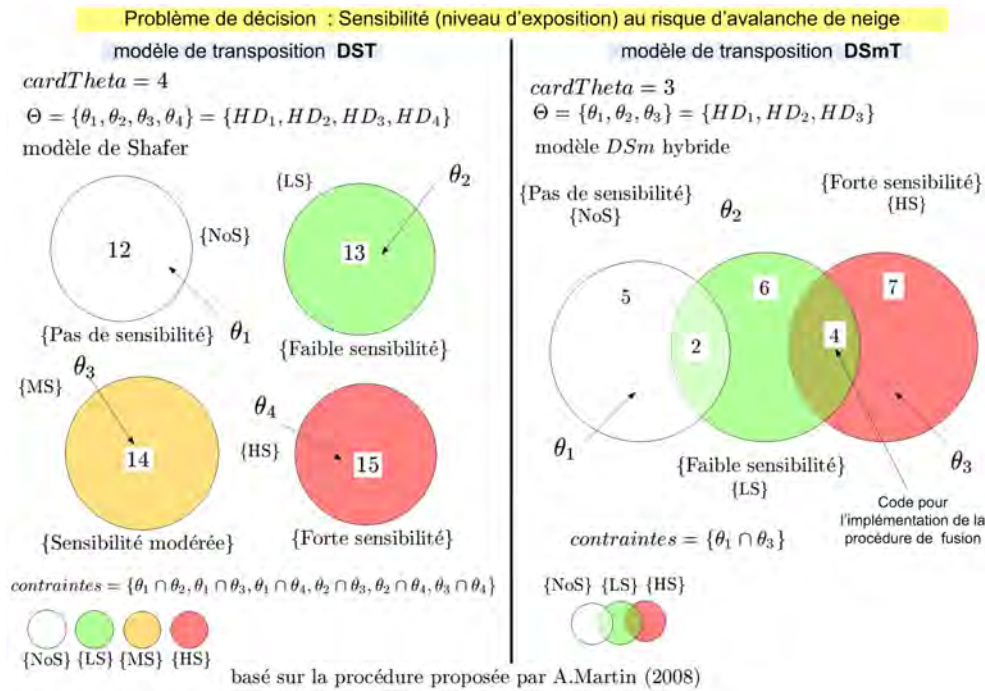


FIGURE 8.5 – Cadre de discernement dans le cadre des modèles de transposition basés sur les théories *DST* et *DSmT* - Les numéros sont des codifications d'éléments de l'hyper-powerset

8.3 Modèle de Transposition ("Mapping") flou des critères quantitatifs

8.3.1 Ensembles flous et possibilités : deux outils pour la transposition vers le cadre de discernement

Dans le contexte des risques naturels en montagne, les évaluations des experts concernent souvent des critères numériques continus tels que l'angle d'une pente d'un couloir d'avalanche (exprimée en degrés), la surface d'une zone de départ (exprimée en m^2), ... Dans le cadre du modèle de décision, une valeur numérique est associée à une intensité de contribution à la décision étudiée : par exemple, on suppose que le risque d'avalanche est évalué selon trois classes *faible*, *moyen*, *fort* définissant les éléments du cadre de discernement de décision. Pour le critère pente, lui-même considéré comme plus ou moins important dans le modèle, une pente de 30° pour un couloir d'avalanche correspond à une contribution élevée au risque d'avalanche. D'un point de vue pratique, on imagine également facilement que les limites entre les niveaux de sensibilité sont floues : supposons que les pentes comprises entre 5% et 10% correspondent à une faible

8.3. MODÈLE DE TRANSPOSITION ("MAPPING") FLOU DES CRITÈRES QUANTITATIFS

sensibilité et que l'intervalle [10% ; 15%] corresponde quant à lui à une sensibilité modérée ou avérée. Une valeur de pente de 11% correspondra à un niveau de sensibilité avéré sans toutefois être très éloigné de la classe *faible sensibilité*. La théorie des ensembles flous permet à la fois de représenter l'appartenance partielle à une classe ou un ensemble et d'établir la correspondance entre des valeurs numériques et des variables dites linguistiques (*faible, modéré, fort*).

Sur un autre plan, un expert ne va pas toujours être capable de fournir une valeur numérique précise pour le critère étudié. Bien souvent, il ne pourra raisonnablement que fournir un ou plusieurs intervalles associés à des valeurs de confiance. Par exemple, on est certain que la valeur sera comprise dans un intervalle très large et on devient de moins en moins certain au fur et à mesure que l'intervalle se réduit. La théorie des possibilités étend la théorie des ensembles flous et offre le cadre théorique permettant de décrire une évaluation sous cette forme d'intervalles emboîtés associés à des valeurs de certitude décroissante.

La démarche proposée exploite ces deux théories pour établir un lien entre l'évaluation des critères et les classes d'évaluation du problème de décision. Les modèles de transposition sont les outils permettant de relier les valeurs numériques d'un critère avec les éléments du cadre de discernement de décision correspondant aux classes d'évaluation de la décision. Les avis d'expert relatifs aux critères quantitatifs sont représentés par des distributions de possibilités. L'évaluation des critères qualitatifs repose quant à elle sur une méthodologie spécifique. Les paragraphes ci-dessous décrivent le principe de ces approches.

8.3.2 Définition des modèles de transposition quantitatifs

Des possibilités aux masses de croyance

Une source (un expert) fournit une évaluation du critère quantitatif sous la forme de n intervalles numériques et affecte, de manière subjective, un niveau de confiance λ_i à chacun d'entre eux. E_i correspond au $i^{\text{ème}}$ intervalle choisi par l'expert (considéré comme une source) avec $i \in \{1, 2, \dots, n\}$. λ_i correspond à une mesure de nécessité $N(E_i)$ et exprime un degré de confiance associé à l'intervalle E_i .

Dubois et Prade (2006)⁵ et Baudrit (2005) décrivent les relations entre la *théorie des possibilités* et la *théorie des fonctions de croyance* (ou de l'évidence). Etant donné une fonction de croyance m définie sur un ensemble fini S , la distribution de possibilités π résultant de m est définie par $\pi(s) = Pl(\{s\})$ (plausibilité des singletons).

Pour des éléments focaux emboîtés E_i tels que $E_1 \subset E_2 \subset \dots \subset E_n$, avec $E_i = \{s_1, \dots, s_i\}$, la mesure de possibilité Π et la mesure de nécessité N (*théorie des possibilités*) correspondent aux fonctions de plausibilité (Pl) et de crédibilité (Bel) (*théorie des fonctions de croyance*). La première étape consiste à passer de mesures de nécessité à des mesures de possibilité (EQ. 8.1) pour les différents intervalles emboîtés définis par la source (FIG. 8.6).

$$\forall x \in \mathbb{R}, \pi(x) = \min_{i \in \{1, 2, \dots, n\}} (\max(1 - \lambda_i, \mathfrak{X}_{E_i}(x))) \text{ avec } \mathfrak{X}_{E_i}(x) = \begin{cases} 1 & \text{si } x \in E_i \\ 0 & \text{si } x \notin E_i \end{cases} \quad (8.1)$$

5. vol. 1, p. 140

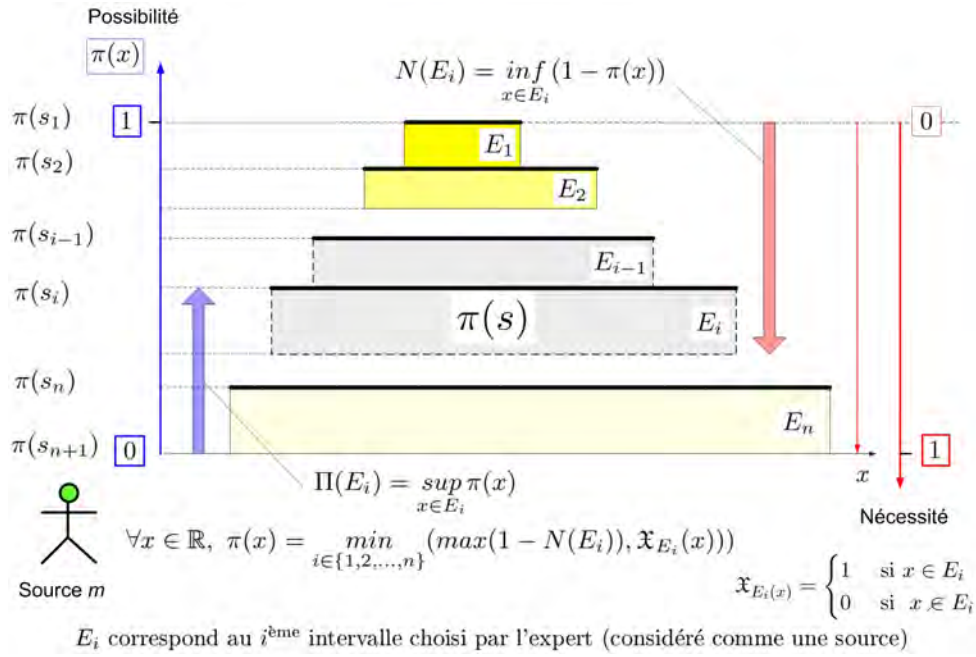


FIGURE 8.6 – Passage de mesures de nécessité à des mesures de possibilité

A partir des mesures de possibilités, on peut alors définir les masses de croyance affectées aux intervalles (FIG. 8.7).

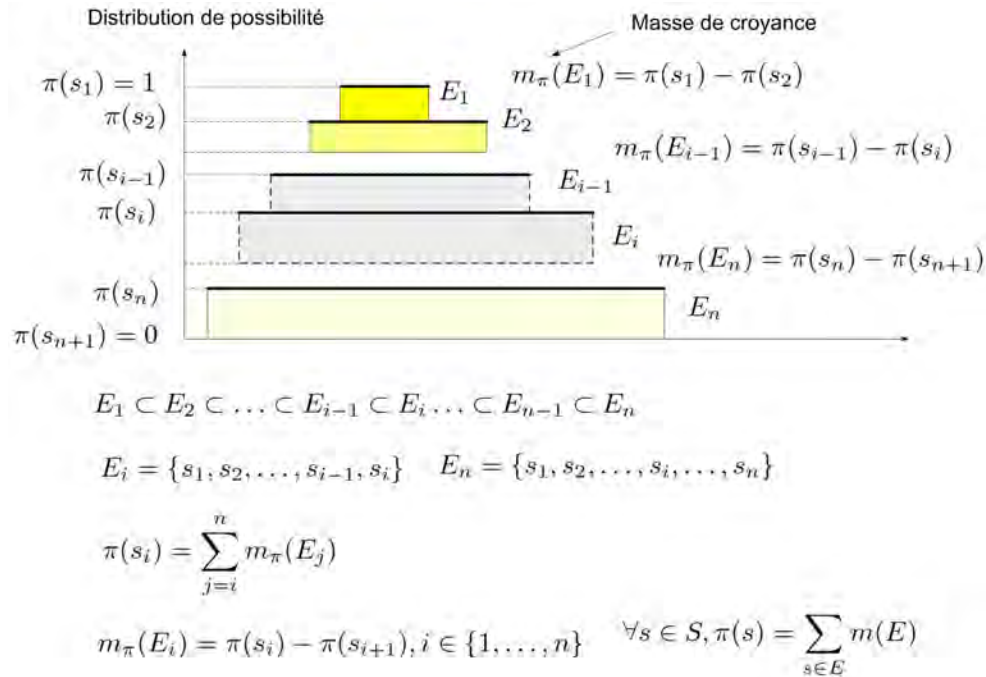


FIGURE 8.7 – Passage de mesures de possibilité à des masses de croyance

La figure (FIG. 8.8) correspond à un exemple numérique synthétisant les différentes étapes de l'évaluation du critère quantitatif par la source à la détermination des masses de croyance associées à chacun des intervalles numériques.

8.3. MODÈLE DE TRANSPOSITION ("MAPPING") FLOU DES CRITÈRES QUANTITATIFS

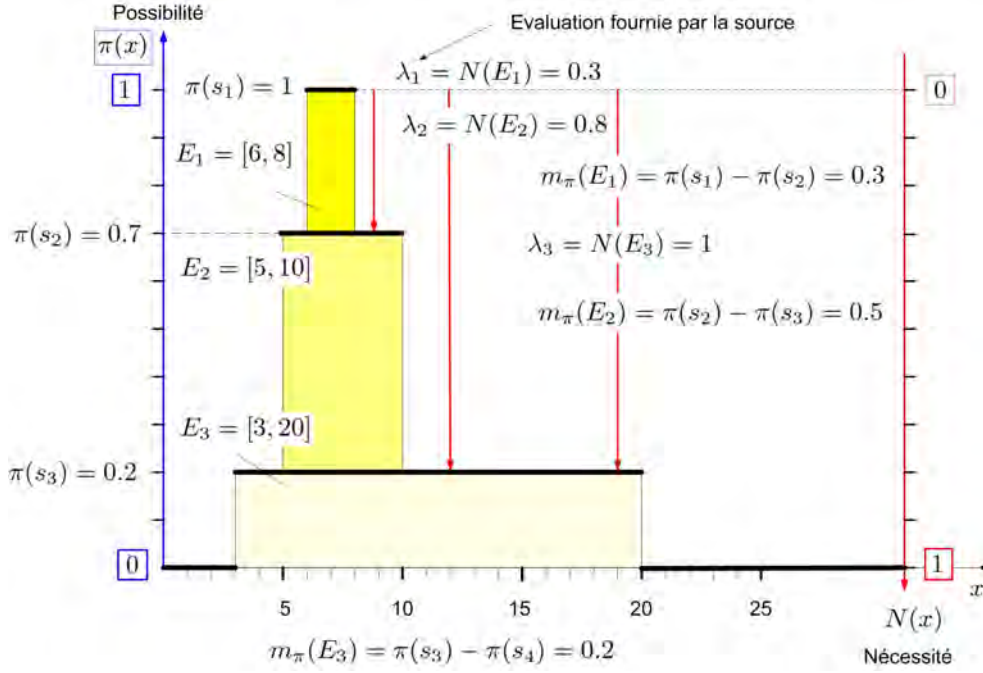


FIGURE 8.8 – Exemple numérique : Passage de mesures de nécessité à des masses de croyance

Pour le critère c_j , chaque source s fournit $nbInt_s$ intervalles numériques E_i emboîtés définis respectivement par un minimum $x_{Inf(s,i)} = \min(E_i)$, un maximum $x_{Sup(s,i)} = \max(E_i)$ et une mesure de nécessité $N(E_i)$. Cette mesure de nécessité représente la confiance minimale dans la proposition "la valeur du critère c_j appartient à l'intervalle $[min(E_i), max(E_i)]$ " (FIG. 8.9). Pour les critères qualitatifs, les intervalles flous concernent non pas des valeurs numériques mais des intervalles de mesures de crédibilité (voir 8.4.1, p. 201).

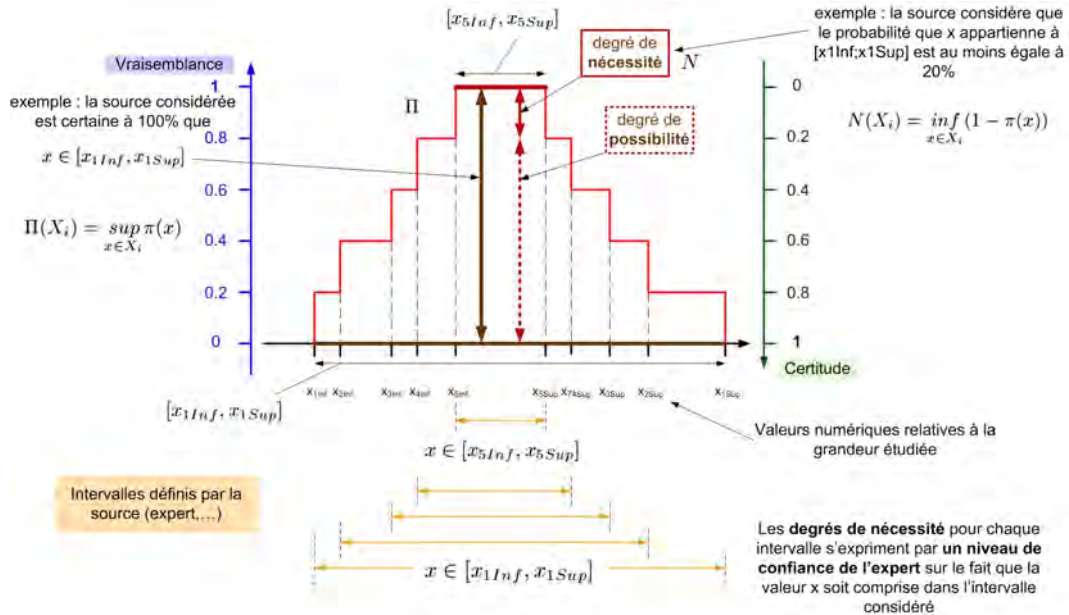


FIGURE 8.9 – Relations entre mesures de nécessité et de possibilité d'après (Baudrit et al., 2005b)

Construction des modèles de transposition quantitatifs

Les modèles de transposition quantitatifs établissent une correspondance entre des intervalles numériques associés à chaque critère quantitatif et les éléments du cadre de discernement commun de décision noté $\Theta_{Decision} = \{HD_1, HD_2, \dots, HD_k, \dots, HD_{GD}\}$ avec GD le nombre de classes d'évaluation du critère général de décision (FIG. 8.10). Les modèles de transposition ("mapping models") correspondent d'une part, à un mode d'interprétation par un expert ou un groupe d'experts de la correspondance entre des intervalles numériques associés à l'évaluation des critères quantitatifs et, d'autre part, à un cadre de discernement commun de décision. Pour un critère quantitatif donné, il peut exister plusieurs modèles de transposition associés à plusieurs opinions d'expert et/ou différentes théories de fusion (DST ou $DSmT$).

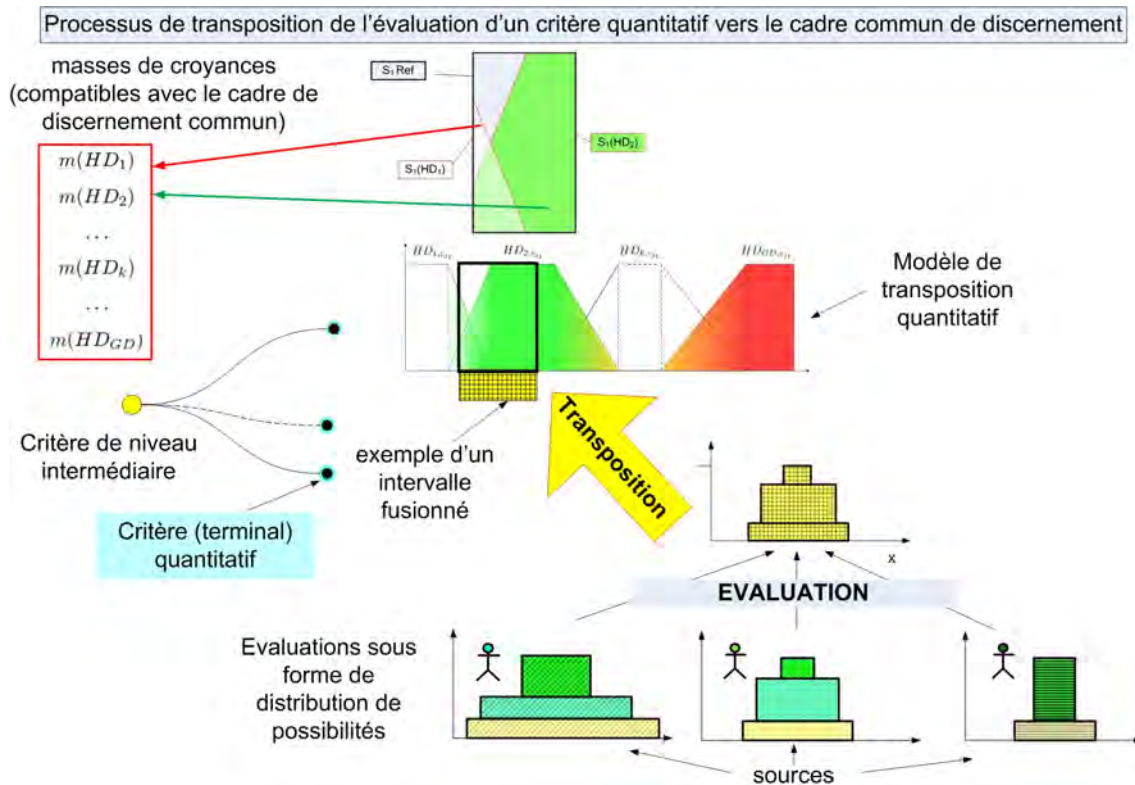


FIGURE 8.10 – Principe et modèles de transposition quantitative

La définition des modèles de transposition ("mapping model") consiste à définir pour chacun des critères c_j du modèle hiérarchique de décision, un ensemble de GD nombres flous (FIG. 8.11) ou d'intervalles flous $L - R$ (FIG. 8.12). Un modèle de transposition quantitative comporte donc toujours autant d'intervalles flous $L - R$ que d'éléments dans le cadre de discernement commun.

8.3. MODÈLE DE TRANSPOSITION ("MAPPING") FLOU DES CRITÈRES QUANTITATIFS

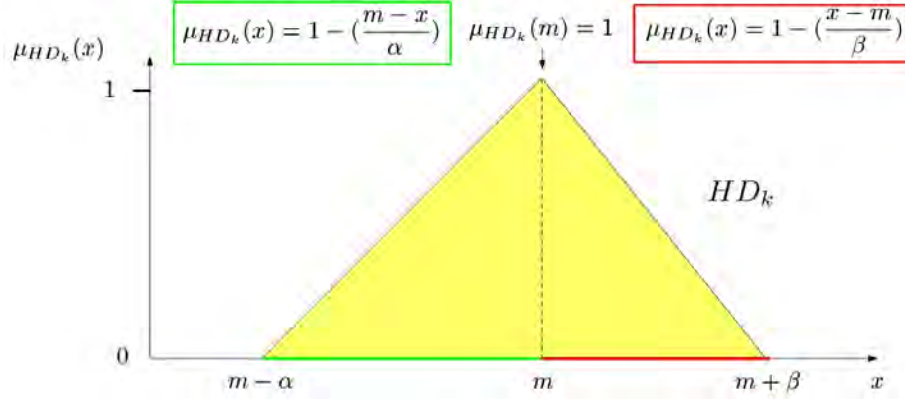


FIGURE 8.11 – Nombre flou

Les intervalles flous $L - R$ sont utilisés pour établir une correspondance entre les évaluations incertaines sous forme d'intervalles numériques relatifs à une grandeur x et une classe (ou un élément) du cadre de discernement de décision commun.

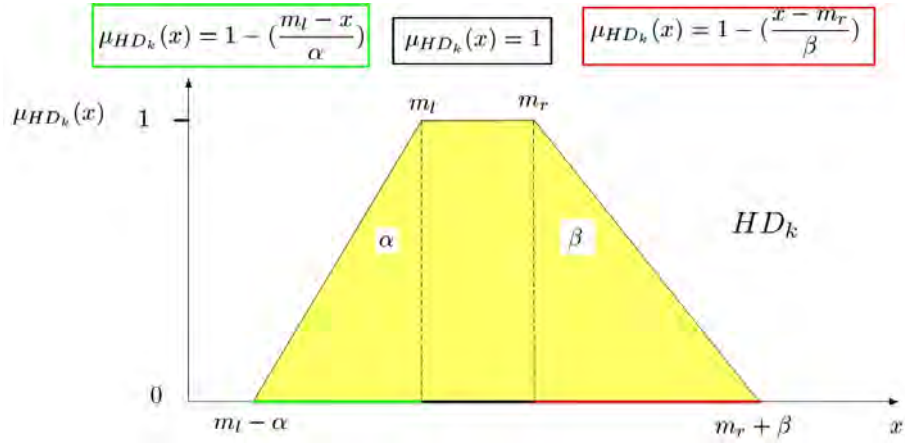


FIGURE 8.12 – Intervalle flou $L - R$

Un même problème de décision peut induire différents modèles de transposition quantitative mis en œuvre soit dans le cadre de la théorie de *Dempster-Shafer* notée *DST* (FIG. 8.13) soit de la théorie de Dezert-Smarandache, notée *DSmT* (FIG. 8.14). Dans le cadre d'un modèle de *Shafer* (*DST*), les intersections entre les éléments du cadre de discernement sont vides par définition. Une hypothèse de "*Sensibilité modérée*" n'est pas considérée comme une sorte de transition entre des niveaux faibles et moyens. Des masses affectées à des hypothèses différentes par les sources génèrent du conflit.

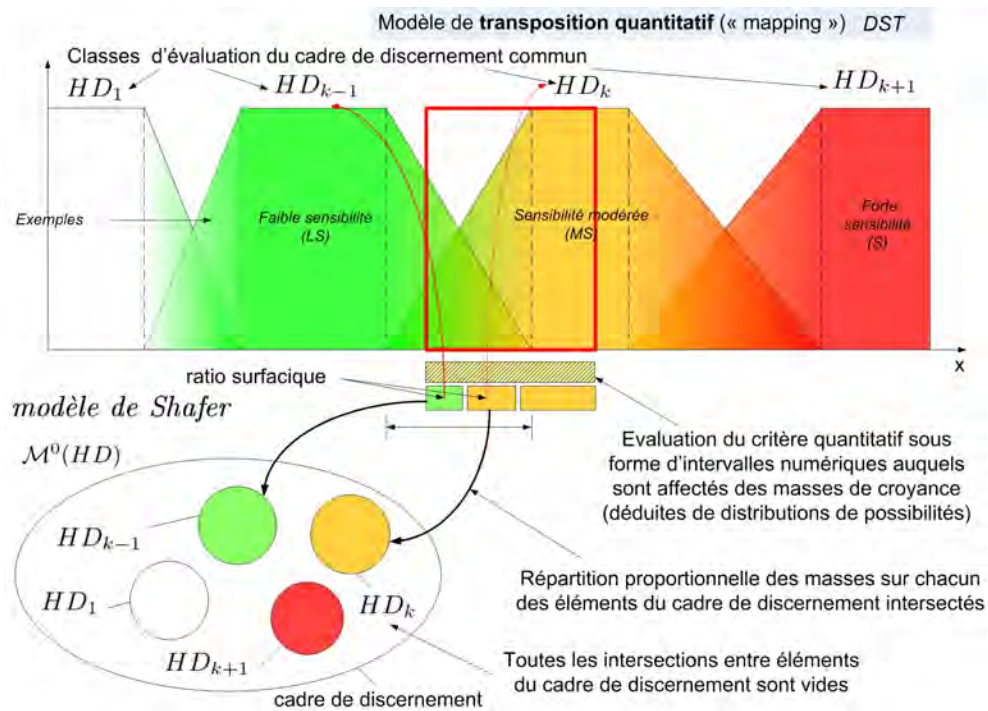


FIGURE 8.13 – Modèle et principe de transposition quantitative dans le cadre de la *DST*

Dans le cadre d'un modèle hybride (*DSmT*), les intersections peuvent être non vides et représenter, par exemple, une variation progressive ou une réelle intersection entre les hypothèses. La sensibilité modérée peut-être vue comme l'intersection entre des niveaux *faible* et *fort* sans véritable notion de conflit. Ce type de modèle nous apparaît donc intéressant, d'un point de vue conceptuel, pour mieux représenter et modéliser la réalité du problème de décision.

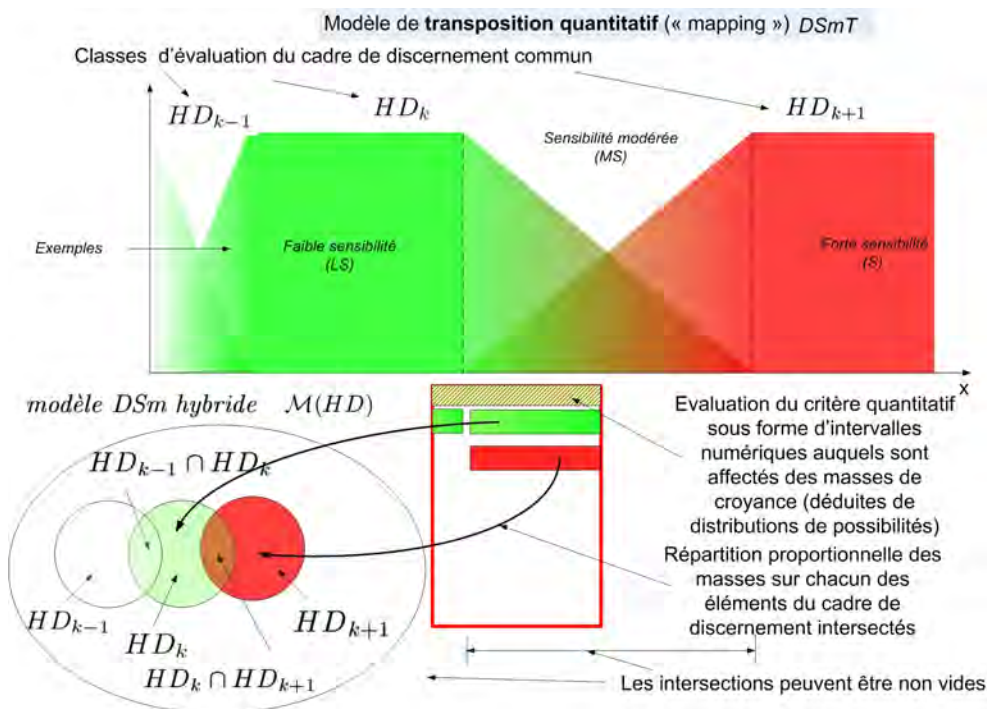


FIGURE 8.14 – Modèle et principe de transposition quantitative dans le cadre de la *DSmT*

8.3. MODÈLE DE TRANSPOSITION ("MAPPING") FLOU DES CRITÈRES QUANTITATIFS

Pour un critère quantitatif c_j donné, une source s fournit une évaluation du critère quantitatif sous la forme d'une distribution de possibilités comprenant $nbInt_s$ intervalles numériques emboîtés notés $I_{(s,int_j)}$. La distribution de possibilités est ensuite transformée en un jeu de masses de croyance relatives aux intervalles numériques.

(FIG. 8.15).

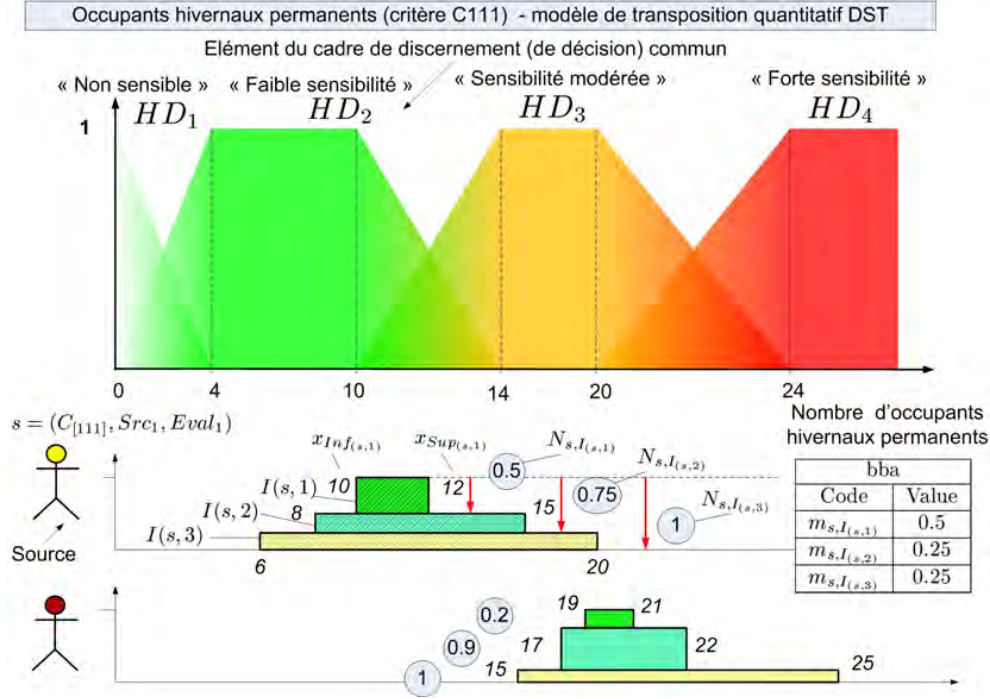


FIGURE 8.15 – Définition de jeu de masse de croyance à partir de l'évaluation d'un critère quantitatif

Le processus de transposition quantitatif ("mapping") noté $mapModel_{(n,c_j)}$ transforme ces masses (provenant des distribution de possibilités) en masses de croyance (*bba*⁶) compatibles avec le cadre de discernement commun de décision (EQ. 8.2). Plusieurs modèles de transposition peuvent être imaginés pour un même critère : n représente le numéro du modèle étudié.

$$\begin{cases} mapModel_{(n,c_j)} : [0, 1] \rightarrow [0, 1] \\ mapModel_{(n,c_j)}(I_{(s,int_j)}) = \{m_{s,I_{(s,int_j)}}(HD_1), \dots, m_{s,I_{(s,int_j)}}(HD_{GD})\} \end{cases} \quad (8.2)$$

Pour chaque intervalle $I_{(s,int_j)}$, le modèle de transposition distribue la masse $m_s(I_{(s,int_j)})$ déduite de la distribution de possibilité sur les éléments du cadre de discernement $\Theta_{Decision} = \{HD_1, HD_2, \dots, HD_k, \dots, HD_{GD}\}$ sur lequel la décision globale est prise. La distribution de $m_s(I_{(s,int_j)})$ sur HD_k ($k \in \{1, 2, \dots, GD\}$) se fait proportionnellement à l'intersection des aires suivantes (FIG. 8.16) :

- la surface de référence constituée par un rectangle de hauteur unité et de largeur égale à la longueur de l'intervalle $I_{(s,int_j)}$ soit $length(I_{(s,int_j)}) = x_{Sup(s,int_j)} - x_{Inf(s,int_j)}$;
- l'intersection entre le rectangle ci-dessus et la surface de l'intervalle flou $L - R$ définie dans le modèle de transposition $mapModel_{n,c_j}$ et notée $A_{mapModel_{n,c_j}}(HD_k)$.

6. basic belief assignment

8.3.3 Mise en œuvre des modèles de transposition quantitatifs

D'un point de vue pratique, les évaluations des critères quantitatifs sont faites par les différentes sources qui fournissent des évaluations sous forme de distributions de possibilités. Celles-ci sont ensuite interprétées en terme de masses de croyance associées aux intervalles avant d'être *transposées* en masses de croyance compatibles avec le cadre de discernement commun. Pour chaque critère, des sources, de fiabilités variables, fournissent des évaluations plus ou moins précises allant de valeurs discrètes à des intervalles numériques emboîtés associés à des mesures de confiance. Après avoir rappelé le principe de la mise en œuvre des modèles de transposition, cette section décrit, pour une source s donnée, les principes de mise en œuvre des modèles de transposition en distinguant successivement :

- une source totalement fiable dans les cas :
 - d'une évaluation par un intervalle imprécis unique ;
 - d'une évaluation par deux intervalles ;
 - d'une évaluation par $nbInt$ intervalles (cas général) ;
- une source partiellement fiable dans les cas :
 - d'une évaluation par un intervalle imprécis unique ;
 - d'une évaluation par une valeur discrète ;
 - d'une évaluation par $nbInt$ intervalles (cas général)

Pour chaque intervalle numérique issu des distributions de possibilités, la masse de croyance est affectée à la surface représentée sur les figures par un rectangle de hauteur unité (en rouge sur les figures). Le principe consiste à calculer une appartenance floue sur la base de surfaces relatives. La masse de croyance issue de la distribution de possibilités est répartie proportionnellement à l'intersection de ce rectangle avec chacun des intervalles (ou nombre) flous associés aux éléments du cadre de discernement.

Cas d'une source totalement fiable - évaluation par un intervalle

La distribution de $m_s(I_{(s,int_j)})$ sur HD_k ($k \in \{1, 2, \dots, GD\}$) se fait proportionnellement à l'intersection des aires suivantes avec $int_j = 1$ (FIG. 8.16) :

- la surface de référence constituée par le rectangle $A_{I_{(s,1)}}$;
- l'intersection notée $A_{I_{(s,1)}}(HD_k)$ entre le rectangle ci-dessus et la surface de l'intervalle flou $L - R$ définie dans le modèle de transposition et codant HD_k .

8.3. MODÈLE DE TRANSPOSITION ("MAPPING") FLOU DES CRITÈRES QUANTITATIFS

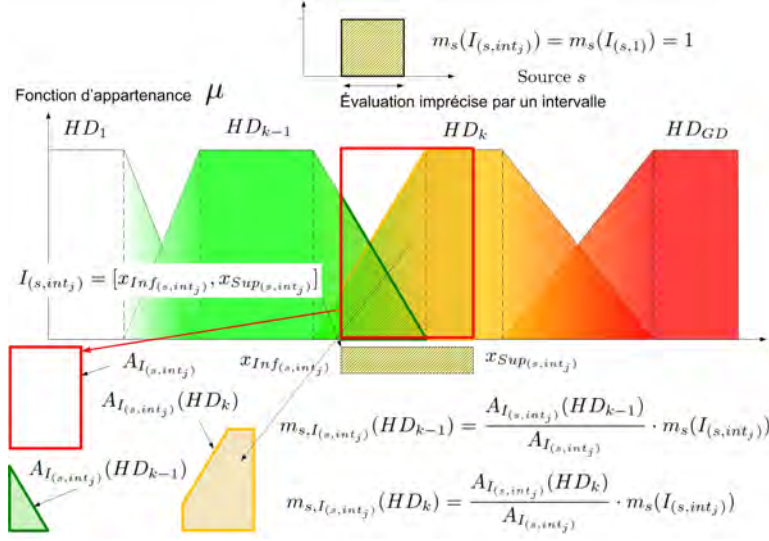


FIGURE 8.16 – Transposition quantitative : Cas d’une source totalement fiable, évaluation par un intervalle imprécis

Ce cas correspond à une source s qui évalue le critère quantitatif sous la forme d’un unique intervalle imprécis ($nbInt_s = 1$) et dont la mesure de nécessité est par conséquent égale à 1. Les étapes de calcul sont les suivantes :

- la masse de croyance de l’intervalle $m_s(I_{s,1}) = 1$ est transférée vers les éléments du cadre commun de discernement ;
- l’intervalle $I_{s,1} = [x_{Inf}(s,1), x_{Sup}(s,1)]$ (sur la base d’une hauteur égale à 1) a une aire totale $A_{I_{s,1}} = length(I_{s,1}) = x_{Sup}(s,1) - x_{Inf}(s,1)$;
- $A_{I_{s,1}}$ représente l’aire totale d’appartenance de l’intervalle avec $A_{I_{s,1}} = A_{I_{s,1}}(HD_{k-1}) + A_{I_{s,1}}(HD_k)$;
- La masse de croyance transposée sur HD_{k-1} est égale à $m_{s,I_{s,1}}(HD_{k-1}) = \frac{A_{I_{s,1}}(HD_{k-1})}{A_{I_{s,1}}} \cdot m_s(I_{s,1})$;
- La masse de croyance transposée sur HD_k est égale à $m_{s,I_{s,1}}(HD_k) = \frac{A_{I_{s,1}}(HD_k)}{A_{I_{s,1}}} \cdot m_s(I_{s,1})$.

Cas d’une source totalement fiable - évaluation par deux intervalles

L’évaluation du critère par la source s est faite par deux intervalles ($nbInt_s = 2$) emboîtés notés $I_{s,1}$ et $I_{s,2}$. Pour chacun des intervalles, la transposition est basée sur une redistribution de la masse de croyance affectée à l’intervalle proportionnellement aux surfaces intersectant les intervalles flous $L - R$ du modèle de transposition (FIG. 8.17).

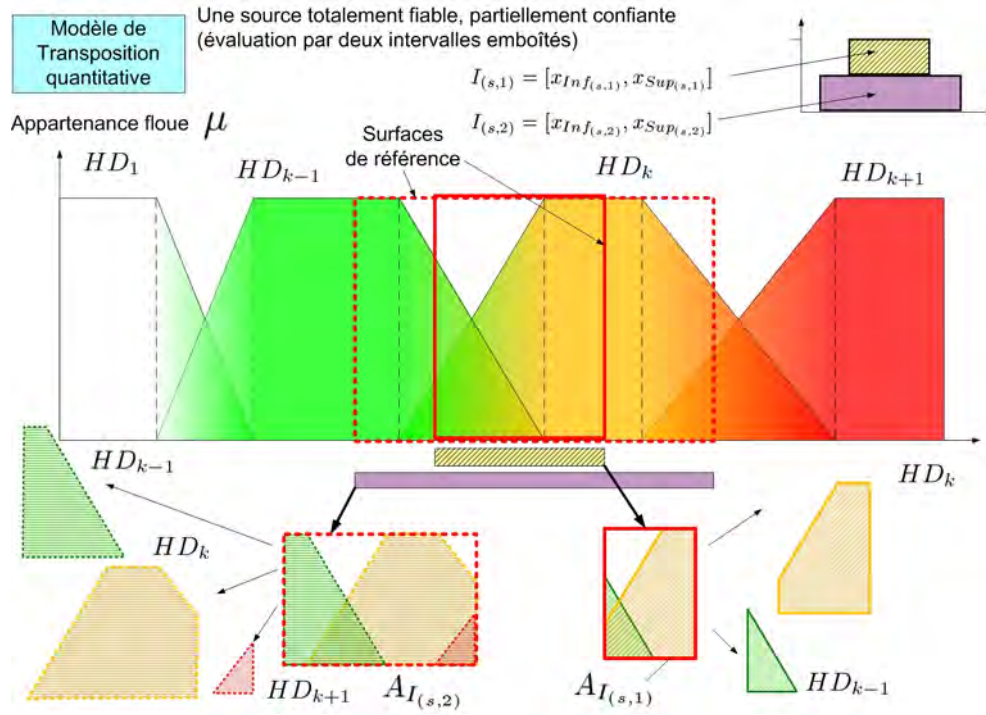


FIGURE 8.17 – Transposition quantitative : Cas d’une source totalement fiable, évaluation par deux intervalles imprécis emboîtés

Pour l’intervalle $I_{(s,1)} = [x_{Inf(s,1)}, x_{Sup(s,1)}]$ (FIG. 8.18) :

- la masse de croyance (*bba*), issue de la distribution de possibilités, est égale à $m_s(I_{(s,1)})$;
- la surface de référence (rectangle) est égale à $A_{I_{(s,1)}} = A_{I_{(s,1)}} = A_{I_{(s,1)}}(HD_{k-1}) + A_{I_{(s,1)}}(HD_k)$;
- la masse de croyance transposée sur HD_{k-1} est $m_{s,I_{(s,1)}}(HD_{k-1}) = \frac{A_{I_{(s,1)}}(HD_{k-1})}{A_{I_{(s,1)}}} \cdot m_s(I_{(s,1)})$;
- la masse de croyance transposée sur HD_k est $m_{s,I_{(s,1)}}(HD_k) = \frac{A_{I_{(s,1)}}(HD_k)}{A_{I_{(s,1)}}} \cdot m_s(I_{(s,1)})$.

8.3. MODÈLE DE TRANSPOSITION ("MAPPING") FLOU DES CRITÈRES QUANTITATIFS

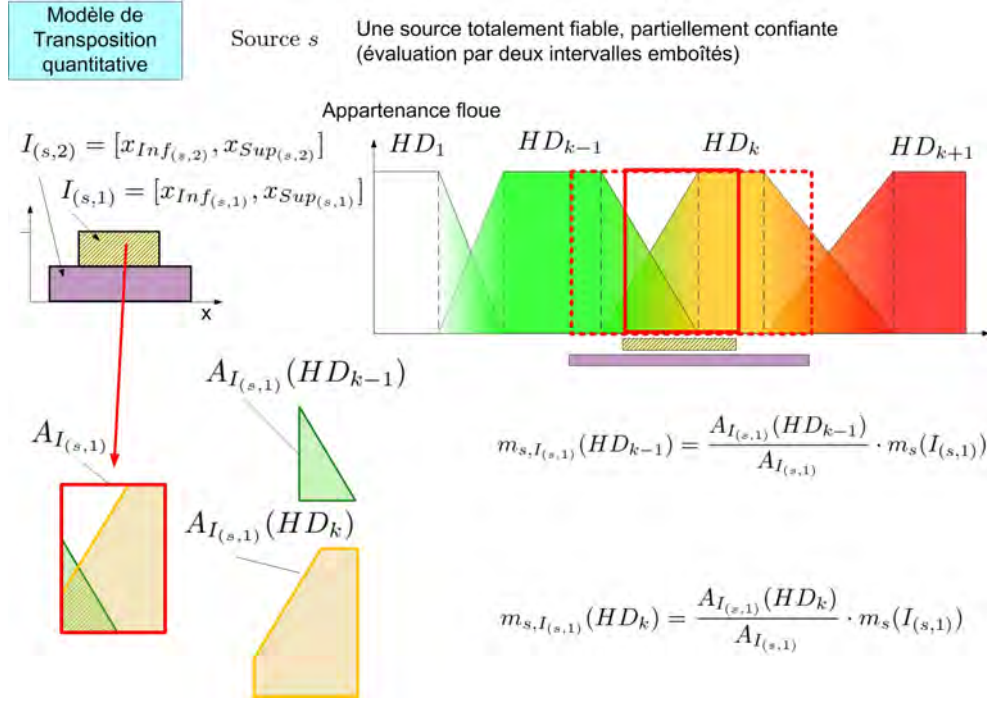


FIGURE 8.18 – Transposition quantitative : Cas d’une source totalement fiable, évaluation par deux intervalles imprécis emboîtés - intervalle 1

Pour l’intervalle $I_{(s,2)} = [x_{Inf(s,2)}, x_{Sup(s,2)}]$ (FIG. 8.19) :

- la masse de croyance (*bba*), issue de la distribution de possibilités, est égale à $m_s(I_{(s,2)})$;
- la surface de référence (rectangle) est égale à $A_{I_{(s,2)}} = A_{I_{(s,2)}} = A_{I_{(s,2)}}(HD_{k-1}) + A_{I_{(s,2)}}(HD_k) + A_{I_{(s,2)}}(HD_{k+1})$;
- la masse de croyance transposée sur HD_{k-1} est $m_{s,I_{(s,2)}}(HD_{k-1}) = \frac{A_{I_{(s,2)}}(HD_{k-1})}{A_{I_{(s,2)}}} \cdot m_s(I_{(s,2)})$;
- la masse de croyance transposée sur HD_k est $m_{s,I_{(s,2)}}(HD_k) = \frac{A_{I_{(s,2)}}(HD_k)}{A_{I_{(s,2)}}} \cdot m_s(I_{(s,2)})$;
- la masse de croyance transposée sur HD_{k+1} est $m_{s,I_{(s,2)}}(HD_{k+1}) = \frac{A_{I_{(s,2)}}(HD_{k+1})}{A_{I_{(s,2)}}} \cdot m_s(I_{(s,2)})$.

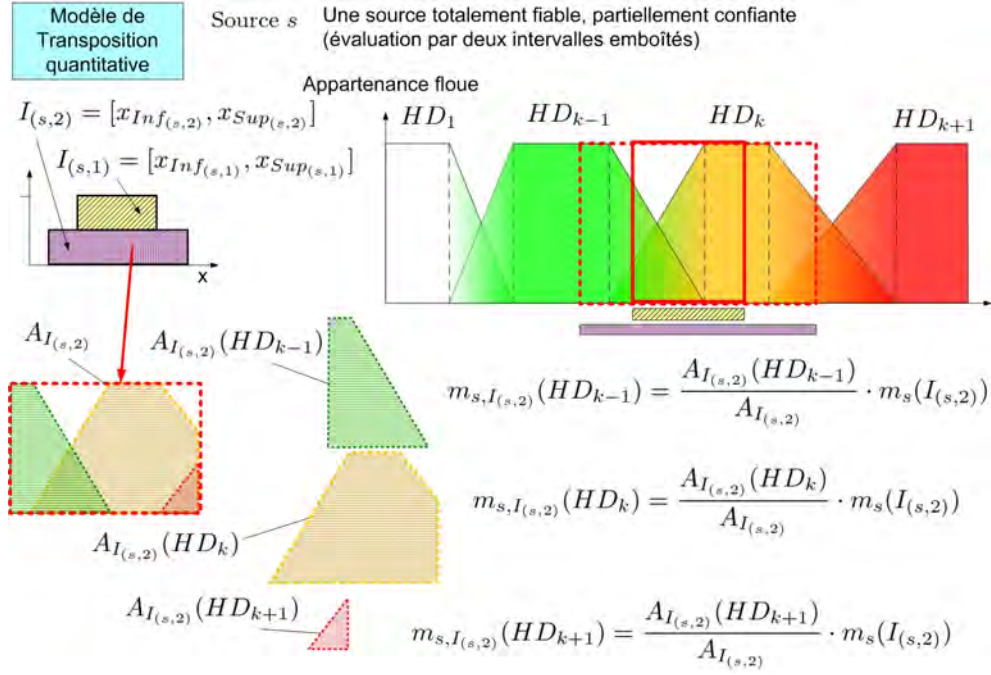


FIGURE 8.19 – Transposition quantitative : Cas d'une source totalement fiable, évaluation par deux intervalles imprécis emboîtés - intervalle 2

Cas d'une source totalement fiable - Généralisation à $nbInt$ intervalles

La source s évalue ici le critère quantitatif par $nbInt$ intervalles. Le $j^{\text{ème}}$ intervalle est défini par $I_{(s,Int_j)} = [x_{Inf(s,Int_j)}, x_{Sup(s,Int_j)}]$ avec $j \in \{1, 2, \dots, nbInt_s\}$.

Pour l'intervalle $I_{(s,Int_j)}$, la surface de référence $A_{I(s,Int_j)}$ a une largeur égale à $length(I_{(s,Int_j)}) = x_{Sup(s,Int_j)} - x_{Inf(s,Int_j)}$ et une hauteur $h_{A_{I(s,Int_j)}}$ égale à 1 (par hypothèse) soit

$$A_{I(s,Int_j)} = length(I_{(s,Int_j)}) * h_{A_{I(s,Int_j)}}$$

La masse de croyance (bba), issue de la distribution de possibilités, est égale à $m_s(I_{(s,Int_j)})$. La masse $m_s(I_{(s,Int_j)})$ est transposée sur les intervalles flous $L - R$ qui ont une intersection non vide avec la surface de référence $A_{I(s,Int_j)}$ soit

$$A_{I(s,Int_j)} = \sum_{j=1}^{nbInt_s} A_{I(s,Int_j)}(HD_k) \text{ avec } k \text{ tel que } A_{I(s,Int_j)} \cap A_{model_x}(HD_k) \neq \emptyset$$

La masse transposée sur HD_k résulte de l'intersection $A_{I(s,Int_j)}(HD_k)$ de la surface de référence avec l'intervalle flou $L - R$ codant le $k^{\text{ème}}$ élément du cadre commun de discernement $\Theta_{Decision}$;

La masse de croyance transposée sur HD_k est égale à

$$m_{s,I(s,Int_j)}(HD_k) = \frac{A_{I(s,Int_j)}(HD_k)}{A_{I(s,Int_j)}} \cdot m_s(I_{(s,Int_j)})$$

La masse transposée sur un élément HD_k du cadre de discernement, résultant des $nbInt_s$ intervalles d'évaluation, est finalement égale à la somme des masses transposées sur l'élément

8.3. MODÈLE DE TRANSPOSITION ("MAPPING") FLOU DES CRITÈRES QUANTITATIFS

par chacun des intervalles soit (Eq. 8.3) :

$$m_s(HD_k) = \sum_{j=1}^{nbInt_s} m_{s,I(s,Int_j)}(HD_k) \quad (8.3)$$

Cas d'une source partiellement fiable - évaluation par un intervalle

La source s est considérée ici comme partiellement fiable. Un facteur d'affaiblissement (de fiabilité) α_s est appliqué à la masse de croyance transposée. La masse $m'(\Theta)$ représente la masse affectée à l'ignorance totale (FIG. 8.20).

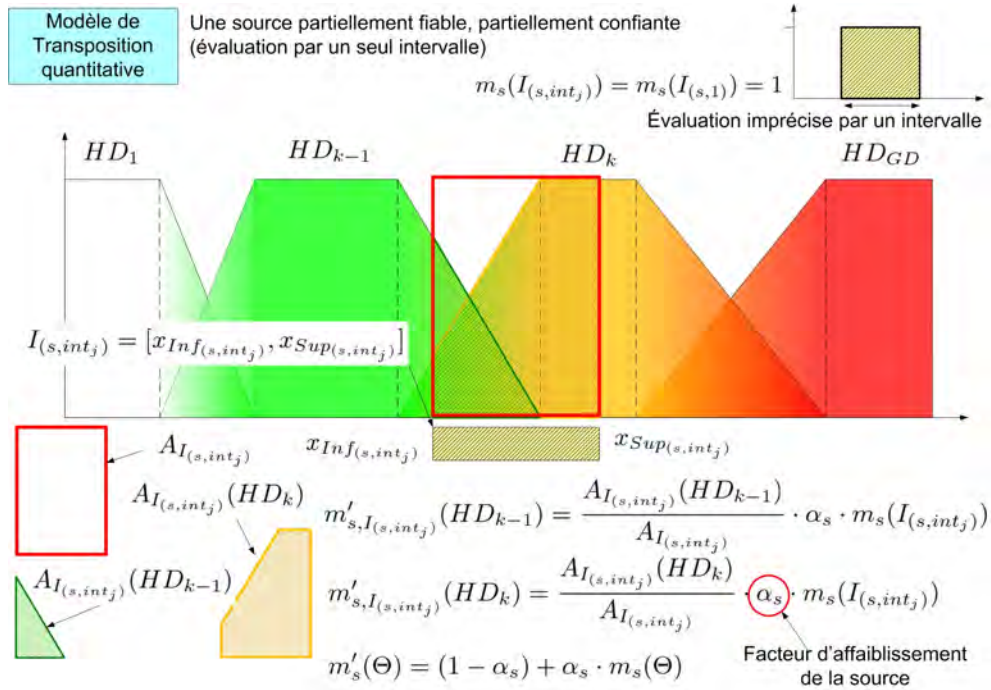


FIGURE 8.20 – Transposition quantitative : Cas d'une source partiellement fiable, évaluation par un intervalle imprécis

Cas d'une source partiellement fiable - évaluation par une valeur discrète

Dans cette configuration, la source s fournit une valeur d'évaluation x_1 discrète et précise du critère quantitatif c_j . La masse de croyance $m(x_1)$ est obtenue par intersection directe (ligne verticale passant par x_1) avec les intervalles flous $L - R$ du modèle de transposition. Un facteur d'affaiblissement α_s est appliqué à la source pour considérer une fiabilité réduite (FIG. 8.21).

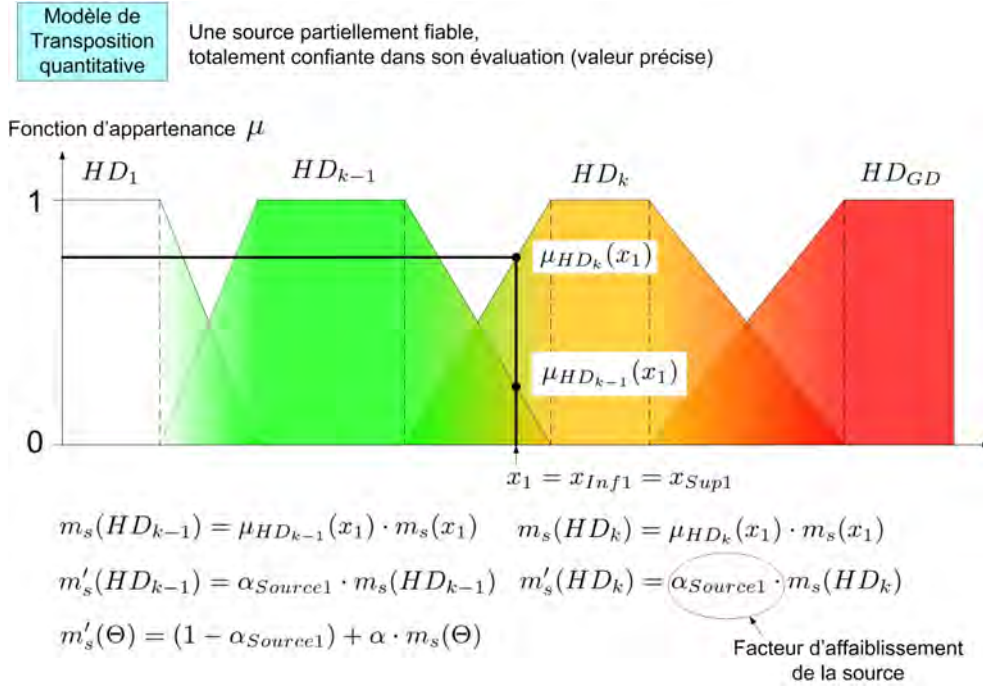


FIGURE 8.21 – Transposition quantitative : Cas d'une source partiellement fiable, évaluation par une valeur précise

Cas d'une source partiellement fiable - Généralisation à $nbInt$ intervalles

La source s considérée comme partiellement fiable évalue ici le critère quantitatif par $nbInt$ intervalles. Le $j^{ème}$ intervalle est défini par $I_{(s,Int_j)}$. Les masses de croyance transposées sont "affaiblies" en utilisant le processus classique d'affaiblissement des sources soit

$$m'_s(HD_k) = \alpha_s \cdot m_s(x_1) \text{ et } m'_s(\Theta) = (1 - \alpha_s) + \alpha_s \cdot m_s(\Theta)$$

Après avoir calculé les masses de croyance transposées sur chacun des éléments HD_k du cadre de discernement commun, les masses de croyance affaiblies sont définies par (FIG. 8.20)

$$m'_{s,I_{(s,Int_j)}}(HD_k) = \frac{A_{I_{(s,Int_j)}}(HD_k)}{A_{I_{(s,Int_j)}}} \cdot \alpha_s \cdot m_{s,I_{(s,Int_j)}}$$

Récapitulatif des phases du processus de transposition quantitative

Les phases successives du processus de transposition quantitative comprennent donc (FIG. 8.22) :

1. la conception du modèle de transposition quantitative comprenant le choix du cadre de discernement, de la théorie DST ou DSMT et la définition des intervalles flous composant le modèle de transposition ;
2. l'évaluation du critère par une source s plus ou moins fiable sous forme imprécise (distribution de possibilités) ou précise (valeur discrète) ;
3. l'expression des masses de croyance à partir des distributions de possibilités ;
4. la transposition des masses pour chaque intervalle d'évaluation ;
5. la synthèse des masses transposées pour chaque élément du cadre de discernement commun ;

8.4. MODÈLES DE TRANSPOSITION ("MAPPING MODEL") ET D'EVALUATION ("SCALING MODEL") FLOUS DES CRITÈRES QUALITATIFS

6. la fourniture d'un jeu de masses compatibles avec le cadre commun et autorisant la fusion selon le processus et l'ordre retenu.

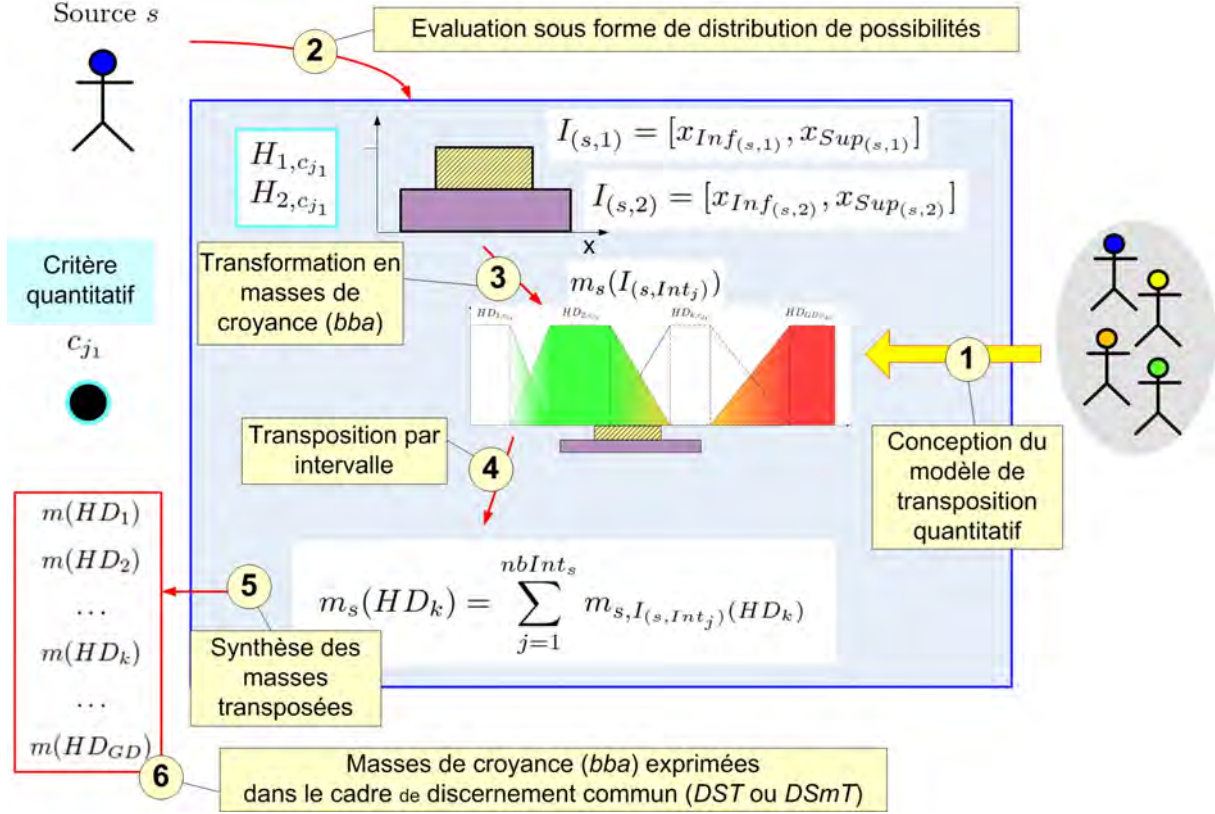


FIGURE 8.22 – Récapitulatif des phases du processus de transposition quantitative

La mise en œuvre du processus est décrite dans les applications sur la base d'algorithmes et outils informatiques partiellement décrits en annexe.

8.4 Modèles de Transposition ("Mapping model") et d'Evaluation ("Scaling model") flous des critères qualitatifs

8.4.1 Modèle de Transposition ("Mapping model") qualitatif

Principe de la transposition qualitative

Un critère qualitatif est un critère c_j dont l'évaluation se présente sous une forme booléenne exprimant l'appartenance à une classe H_{Qualg,c_j} avec $g \in \{1, 2, \dots, G_{c_j}\}$ où G_{c_j} représente le nombre de classes d'évaluations du critère c_j . Les classes pouvant éventuellement être des intervalles numériques sont pré-définies et ne peuvent pas varier.

Le processus de transposition qualitative transforme l'évaluation qualitative d'un critère en une masse de croyance exprimée dans le cadre de discernement commun. Dans le cas d'un critère quantitatif, on a montré précédemment comment la définition d'intervalles numériques sous forme de distribution de possibilités permet d'obtenir une masse de croyance associée à un intervalle (voir 8.3)⁷. Dans le cadre d'un critère qualitatif, il n'existe pas de méthode directe permettant d'établir une correspondance entre l'évaluation basée sur l'appartenance à une classe

7. p. 186

et une masse de croyance. Le principe global de la méthodologie proposée *ER-MCDA* consiste à évaluer une alternative (en vue de prendre une décision) en prenant en compte l'importance relative des critères, la nature imparfaite et incertaine des informations et la fiabilité des sources. Pour un critère qualitatif donné, la méthodologie comprend trois phases principales et sept étapes décrites sur la figure 8.23.

Définition des modèles d'évaluation qualitative Dans un premier temps (étape 1), on définit un modèle d'évaluation qualitative ("scaling model") qui décompose les éléments du cadre de discernement en classes d'évaluation qualitatives ou parties d'un *modèle d'évaluation* en utilisant soit le cadre théorique de la *DST*, soit celui de la *DSmT*. Les parties ou éléments du modèle d'évaluation qualitative sont ensuite analysés (étape 2) en termes d'importance relative selon un principe de comparaison par paires comme dans le cadre d'une méthode dérivée de l'analyse multicritères hiérarchique (*AHP*) classique. Les poids sont ensuite interprétés en masses de croyance utilisés pour définir des mesures de crédibilité utilisées dans le modèle de transposition qualitative (étape 3).

Evaluation imprécise et incertaine de l'alternative Dans un second temps, on procède pour chaque source à l'évaluation de l'alternative. Pour chaque partie du modèle d'évaluation qualitatif concernant l'alternative étudiée, la source s évalue les niveaux de confiance haut et bas avec lesquels elle considère que l'alternative étudiée comprend la partie ou l'élément (étape 4). La valeur de crédibilité Bel_g issue du modèle d'évaluation qualitative constitue ici un maximum possible dans le cas où la source est totalement confiante dans son évaluation. On utilise les estimations faites par l'évaluateur sur chacun des éléments pour calculer un facteur d'affaiblissement global (étape 6).

Transposition de l'évaluation qualitative L'évaluation qualitative a la forme d'un intervalle noté $BelInt_{c_j} = [BelInt_{min,c_j}, BelInt_{max,c_j}]$ de deux valeurs haute et basse de crédibilité (étape 5). La dernière étape consiste à transposer cet intervalle sous la forme d'un jeu de masse de croyance compatible avec le cadre de discernement de décision commun $\Theta_{Decision} = \{HD_1, HD_2, \dots, HD_k, \dots, HD_{GD}\}$ (étape 7).

Ces étapes sont décrites dans les paragraphes ci-dessous et mises en application dans la section 9.1⁸.

8. p. 223

8.4. MODÈLES DE TRANSPOSITION ("MAPPING MODEL") ET D'EVALUATION ("SCALING MODEL") FLOUS DES CRITÈRES QUALITATIFS

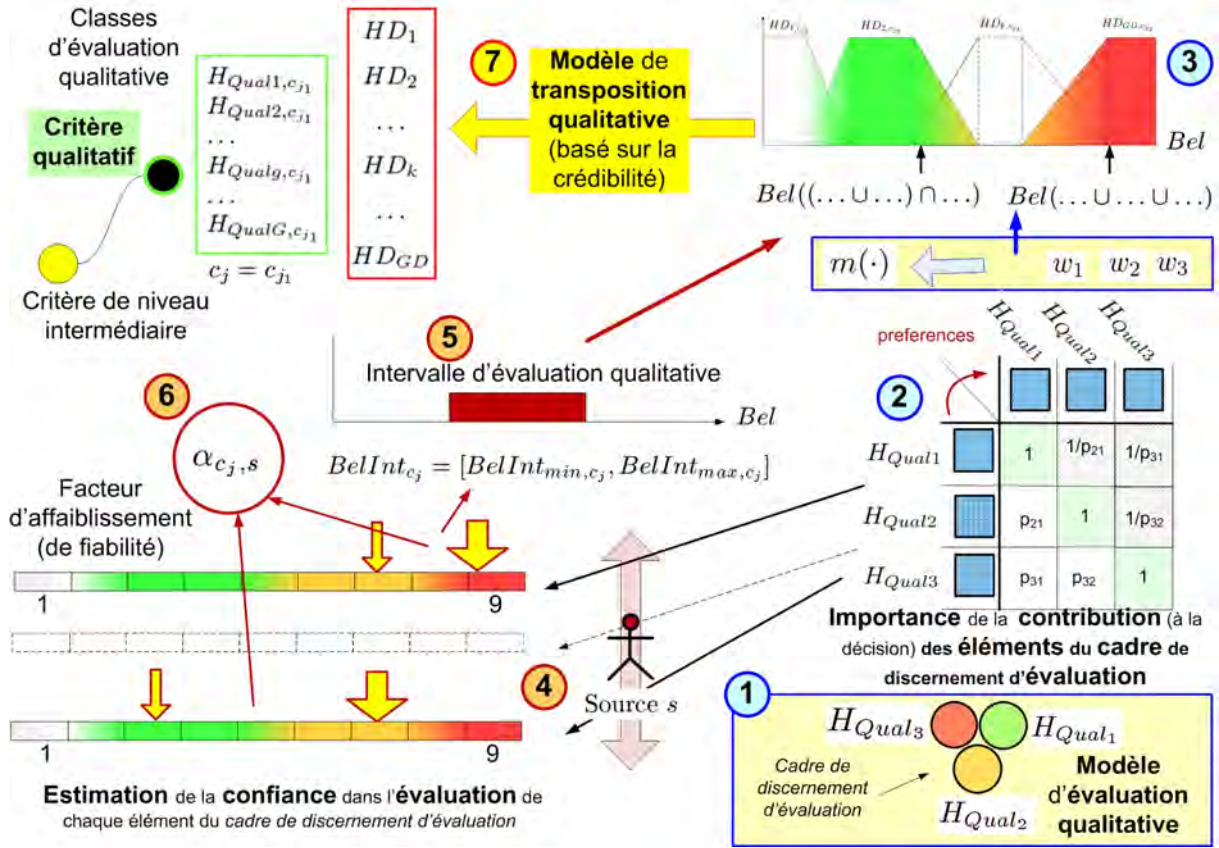


FIGURE 8.23 – Etapes des processus d'évaluation et de transposition qualitatives vers le cadre de discernement commun (de décision)

8.4.2 Construction des modèles d'évaluation ("Scaling model") et de transposition qualitative

Définition du cadre de discernement d'évaluation qualitative (*DST* ou *DSmT*)

Cette étape (étape 1, FIG. 8.23) consiste à modéliser les classes d'évaluations du critère qualitatif pour en permettre l'évaluation ultérieure. Le principe et l'intérêt de l'approche sont introduits au travers d'un exemple⁹. On considère ici qu'on l'on doit évaluer la sensibilité par rapport à un critère dit d'*infrastructures*. Les infrastructures peuvent être soit des équipements collectifs (écoles, crèches, salles communales ...), industriels (usines, stations de pompage ...) ou de secours (caserne de pompiers, mairie ...). Les équipements de secours sont jugés plus sensibles que les équipements industriels eux-mêmes jugés plus sensibles que les équipements collectifs. Sur un site donné, ces éléments peuvent être présents seuls ou sous forme de combinaisons associant, par exemple, une école et une usine. Cette configuration sera plus sensible que le cas de la seule présence d'une école ou d'une usine. Dans le modèle opérationnel initial, les associations de classes d'infrastructure sont ainsi classées en termes de sensibilité les unes par rapport aux autres. Ce classement ne prend par contre pas en compte les cas d'infrastructures mixtes : imaginons une zone fictive comportant un central téléphonique, une usine et une caserne de pompiers. La décomposition classique conduit à identifier des équipements appartenant exclusivement à la classe équipements industriels (usine), à la classe secours (caserne de pompiers) et un cas mixte correspondant au cas du central téléphonique qui est à la fois un équipement industriel et de secours. Il est donc potentiellement plus sensible car il concentre au

9. voir 9.1 p. 223

même endroit deux caractéristiques. Comment prendre en compte les combinaisons de classes d'évaluations et proposer une gradation dans l'évaluation de critères "composites" ?

La définition de différents modèles d'évaluation qualitative répond à cet objectif. Dans le cadre de la théorie de la *DST*, on ne peut pas prendre en compte le cas ci-dessus sans créer une classe fictive (raffinement du modèle). De manière assez contradictoire, cette classe correspond alors à l'intersection de deux classes mais n'a par hypothèse de la théorie aucune intersection avec les autres classes. Le cadre de la *DSmT* permet d'un point de vue conceptuel de traiter plus correctement cette configuration. Les deux contextes sont donc envisagés.

Dans le cas de critères qualitatifs, le modèle d'évaluation qualitative, basé sur un cadre de discernement dit "d'évaluation", va décomposer les classes d'évaluation des critères qualitatifs en éléments ou parties permettant de prendre en compte et d'évaluer les éventuelles intersections entre classes. Une classe d'évaluation du critère qualitatif peut donc correspondre à une ou plusieurs parties du modèle d'évaluation.

La théorie *DSmT* est utilisée ici comme support conceptuel pour représenter les éléments composant les classes d'évaluation qualitative du critère. Elle permet une description plus fine et réaliste du contexte d'évaluation en considérant notamment les cas de combinaisons complexes entre des classes d'évaluation. Dans une représentation sous forme d'un diagramme de Venn¹⁰ du modèle d'évaluation, on note ici θ_1 , θ_2 et θ_3 les classes d'évaluation du critère qualitatif. Dans le cadre de la *DST*, les parties ou éléments du modèle correspondent aux classes d'évaluation qualitatives. Dans un modèle *DSmT*, les classes correspondent à l'union de plusieurs parties (ou éléments) du modèle (FIG. 8.24).

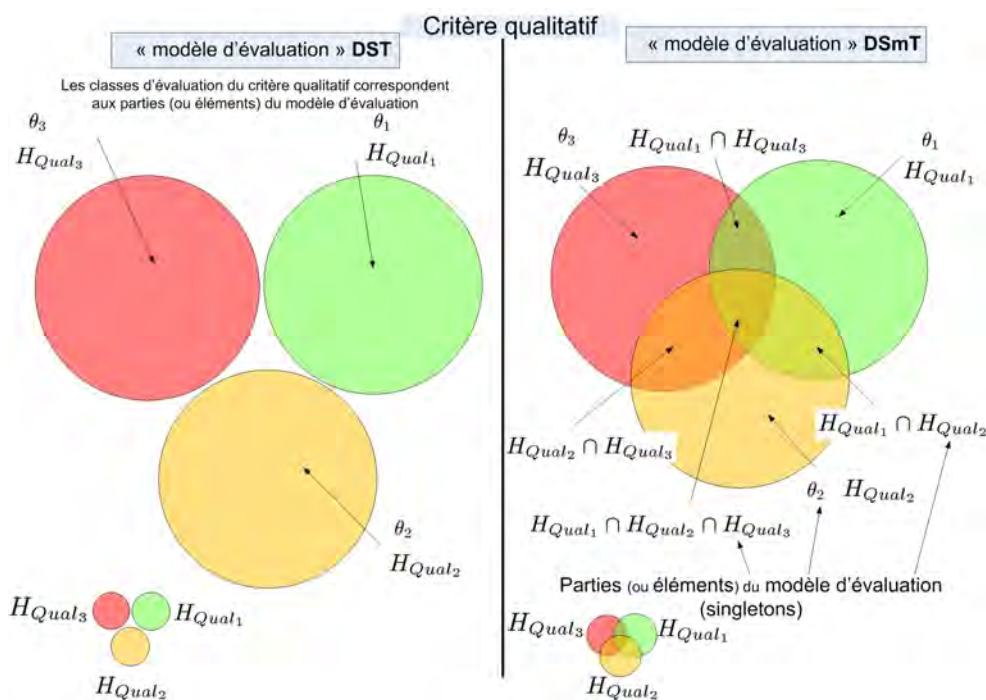


FIGURE 8.24 – Définition du cadre de discernement du modèle d'évaluation qualitative dans le contexte de la *DST* et de la *DSmT* sous forme d'un diagramme de Venn

L'importance des classes qualitatives est traduite en masses de croyance

L'importance relative de chacune des classes d'évaluation du critère qualitatif traduit leur contribution respective à la décision. Pour décrire l'importance globale d'une classe d'évaluation

10. du nom du mathématicien anglais John Venn(1834-1923), inventeur de cette représentation

8.4. MODÈLES DE TRANSPOSITION ("MAPPING MODEL") ET D'EVALUATION ("SCALING MODEL") FLOUS DES CRITÈRES QUALITATIFS

qualitative, la méthode consiste à définir l'importance de chacune des parties constituant cette classe. Cette importance correspond à la notion de préférence évaluée classiquement par la méthode de comparaison par paires de la méthode *AHP*. Les poids calculés pour les parties (ou éléments) du modèle d'évaluation qualitative ont les propriétés d'un jeu de masses de croyance (Yager, 2008) soit $w_g \in [0, 1]$ et $\sum w_g = 1$ et sont interprétés comme tels (étape 2, FIG. 8.23). Pour chaque élément, les poids sont considérés comme des masses de croyance. Comme les éléments focaux sont des singletons, sur la base des principes de modélisation choisis, ces masses de croyance sont équivalentes à des mesures de crédibilité (Eq. 8.4) .

$$w_{(H_{Qualg,c_j,s})} = m_{(H_{Qualg,c_j,s})} = Bel_{(H_{Qualg,c_j,s})} \quad (8.4)$$

Les combinaisons croissantes (unions) des éléments du modèle d'évaluation qualitative correspondent à des niveaux d'importance croissante dans le modèle général de décision. La crédibilité d'une combinaison donnée peut donc être assimilée à une mesure de cette importance dans le processus de décision. Une valeur de crédibilité peut donc être calculée pour chaque classe d'évaluation qualitative sur la base des crédibilités associées aux éléments ($Bel_{(H_{Qualg,c_j,s})}$ notée Bel_g sous une forme simplifiée) qui la composent (un ou plusieurs éléments selon le modèle théorique *DST* ou *DSmT* considéré).

Modèle de transposition qualitative

A partir du moment où l'on dispose d'une évaluation sous la forme d'un intervalle numérique, le modèle et la méthode de transposition qualitative sont similaires à celles développées pour les critères quantitatifs. Le modèle de transposition qualitative est composé d'intervalles flous $L - R$ définis sur la base de noyau et de support correspondant à des valeurs de crédibilités issues du modèle d'évaluation qualitative.

8.4.3 Processus d'évaluation qualitative

Indices de confiance dans l'évaluation

Ce processus (étape 4, FIG. 8.23 et FIG. 8.25) vise à produire un intervalle numérique permettant la transposition vers le cadre commun de discernement de décision. Le *modèle d'évaluation qualitative* a fourni plus haut une décomposition des classes d'évaluation qualitative du critère c_j en éléments (singletons) permettant de décrire les combinaisons entre les classes d'évaluation. Pour une alternative donnée, chaque source va évaluer la présence des éléments. La présence d'un élément g est prise en compte par un facteur booléen $input_{(H_{Qualg,c_j,s})}$ noté $input_g$ sous forme simplifiée (prenant une valeur nulle en cas d'absence et 1 en cas de présence). La source s estime alors la confiance qu'elle a dans la présence de l'élément g par des indices inférieur et supérieurs choisis sur une échelle ordinale du type de celle proposée par (Saaty, 1982). Ces valeurs sont normalisées pour calculer des valeurs hautes ($conf_{max}$), basses ($conf_{min}$) et moyennes ($conf_{mean}$) d'un *indice de confiance*.

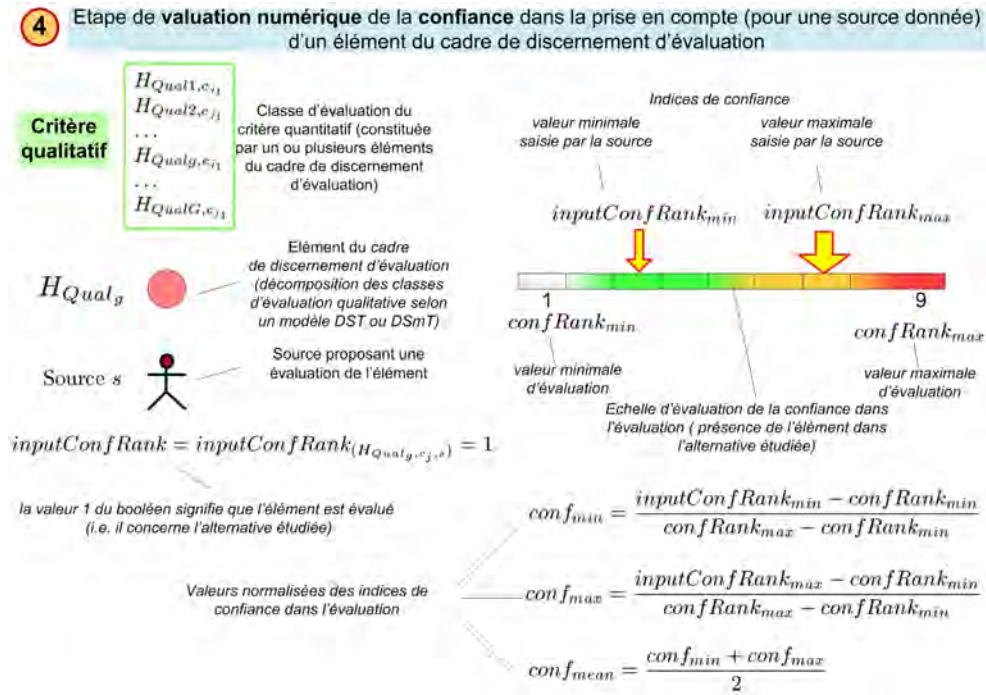


FIGURE 8.25 – Définition des indices de confiance minimum, maximum et moyen associé à l'évaluation d'un élément

Intervalle d'évaluation qualitative

A partir de la valeur de crédibilité de l'élément g notée $Bel_{(H_{Qualg, c_{jg}}, s)}$ ou Bel_g sous une forme simplifiée et des indices de confiance, on détermine (étape 5, FIG. 8.23 et FIG. 8.26) des bornes de crédibilité hautes et basses pour chaque élément puis l'intervalle d'évaluation qualitative $BelInt_{c_j} = [BelInt_{min, c_j}, BelInt_{max, c_j}]$ qui est utilisé ensuite dans le processus de transposition qualitative.

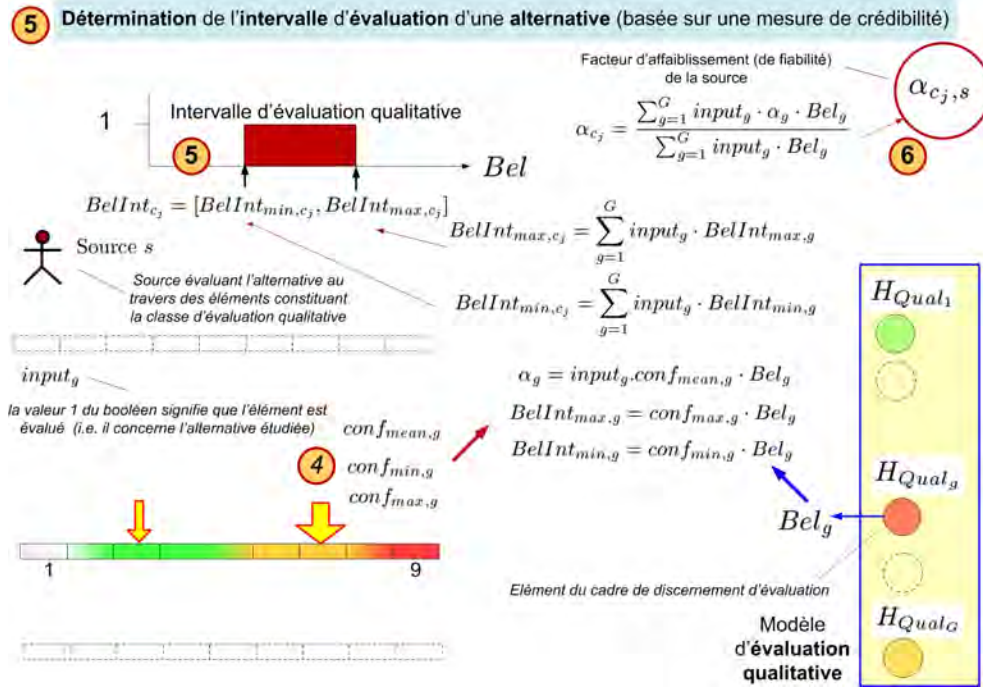


FIGURE 8.26 – Définition de l'intervalle d'évaluation qualitative

Facteur d'affaiblissement

A partir des indices de confiance calculés sur chacun des éléments, on peut déterminer un facteur d'affaiblissement global (étape 6, FIG. 8.23 et FIG. 8.26).

Dans le modèle actuel, le facteur d'affaiblissement (de fiabilité) est appliqué aux masses de croyance transposées issues de l'évaluation qualitative. Cette approche développée en première approche peut s'avérer discutable car elle cumule deux affaiblissements successifs des masses de croyance, en phase d'évaluation puis en phase de transposition. On pourrait imaginer de ne pas appliquer le facteur d'affaiblissement de fiabilité aux masses de croyance transposées en ne laissant qu'à ce facteur un rôle indicatif du niveau de confiance dans l'évaluation. Dans ce cas, par contre, on ne propage pas le niveau d'ignorance identifié lors de la phase d'évaluation.

8.5 Processus de fusion des avis d'experts et règle de décision

Cette dernière étape fusionne les critères considérés comme des sources pour aboutir à une évaluation du critère de décision par rapport aux différents éléments du cadre de discernement.

8.5.1 Ordre de fusion

La détermination de l'ordre de la fusion fait partie des points essentiels dans la formalisation d'un problème de fusion (Sentz and Ferson, 2002). Jusqu'où faut-il ou ne faut-il pas suivre la décomposition hiérarchique dans la détermination de l'ordre de fusion. Dans le cas d'une source, les stratégies de fusion peuvent être basées sur le regroupement de critères ou au contraire sur une fusion "à plat" des critères, indépendamment de la structure hiérarchique (FIG. 8.27). Deux modes de fusion existent : La fusion statique et la fusion dynamique. Le cas statique correspond à la fusion simultanée de toutes les sources. Le cas dynamique correspond à la fusion d'un groupe de sources puis la fusion du résultat avec d'autres sources. Ce dernier cas correspond par exemple au contexte de données qui sont acquises successivement. Dans ce cas, les dernières

CHAPITRE 8. LA MÉTHODOLOGIE (ER-MCDA) : ANALYSE MULTICRITÈRES ET FUSION D'INFORMATION

sources fusionnées influencent majoritairement le résultat. Les ordres de fusion dépendent de la problématique de décision et constituent une des difficultés de la méthodologie. Imaginons que plusieurs experts évaluent chacun une alternative selon différents critères. Deux stratégies sont possibles :

- la première consiste à d'abord évaluer complètement l'alternative pour chaque expert en fusionnant éventuellement ses propres avis (de manière dynamique). Elle impose que chaque expert évalue complètement l'alternative. On obtient alors pour chaque expert un ensemble de jeux de masses exprimés sur le cadre de discernement commun de décision. Ce processus permet d'identifier comment chaque expert a construit sa décision en fonction de ses imprécisions et de ses incertitudes. En fusionnant les avis d'expert, on obtient une décision qui compare des avis d'expert ;
- la seconde méthode consiste à fusionner les avis d'expert, exprimés au travers des évaluations, au niveau de chaque critère. On obtient alors une information sur la contribution de chaque critère à la décision.

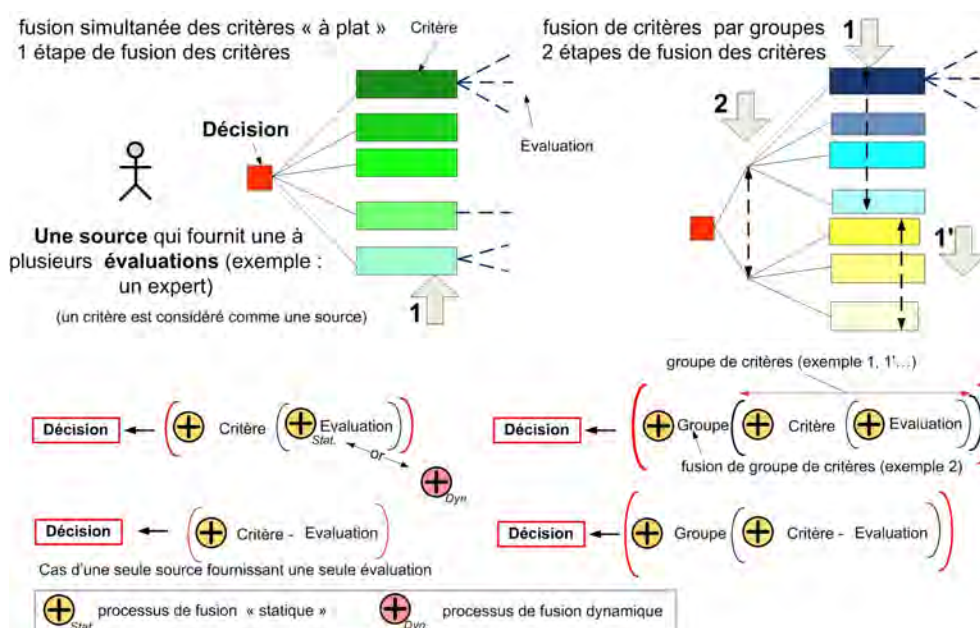


FIGURE 8.27 – Stratégies de fusion

Dans le cas de plusieurs sources évaluant les critères, le nombre de stratégies de fusion est encore plus important (FIG. 8.28). Les résultats de fusion ne sont pas identiques selon ces différents processus dès que l'on utilise une règle de fusion qui n'est pas associative. L'ordre est donc déterminant et correspond à un objectif d'interprétation des résultats particuliers. Des études de sensibilité doivent être faites pour comparer les différentes stratégies.

8.5. PROCESSUS DE FUSION DES AVIS D'EXPERTS ET RÈGLE DE DÉCISION

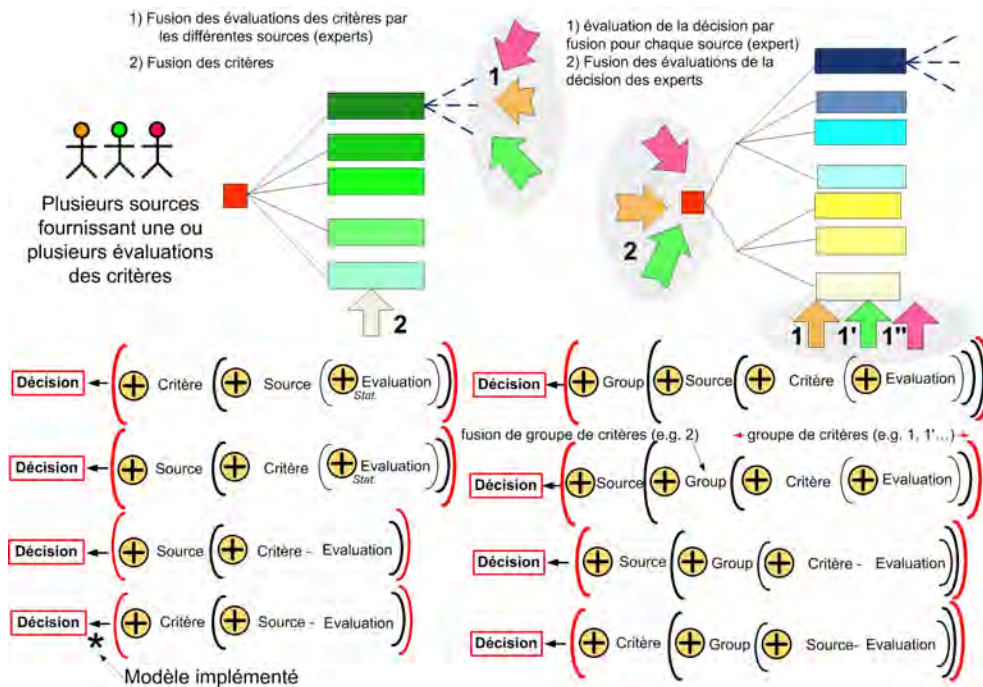


FIGURE 8.28 – Est-ce que le processus de fusion doit suivre le modèle de décision (cas de plusieurs sources) ?

Dans une première approche, le modèle implémenté correspond au modèle $(+ \text{Critère} (+ \text{Source} - \text{Evaluation}))$ (FIG. 8.29), les signes $+$ correspondant à une étape de fusion. Dans ce modèle, le nombre de sources fusionnées au niveau de chaque critère correspond au produit du nombre de sources par le nombre d'évaluations proposées par chaque source. Ce modèle est retenu car il nous semble le plus proche de la démarche d'analyse multicritères en fusionnant effectivement des critères pour obtenir une décision. De plus, il permet de prendre en compte des nombres d'évaluations variables d'un critère à un autre. Les deux étapes de fusion nous semblent devoir être conservées pour permettre d'obtenir une information compatible avec le modèle de décision hiérarchique. Pour un critère donné, le processus de fusion permet de voir comment un critère contribue à chacune des classes du cadre de discernement commun et de mesurer l'incertitude associée à l'évaluation ($m(\Theta)$). Comme indiqué ci-dessus, cet ordre n'est pas exclusif.

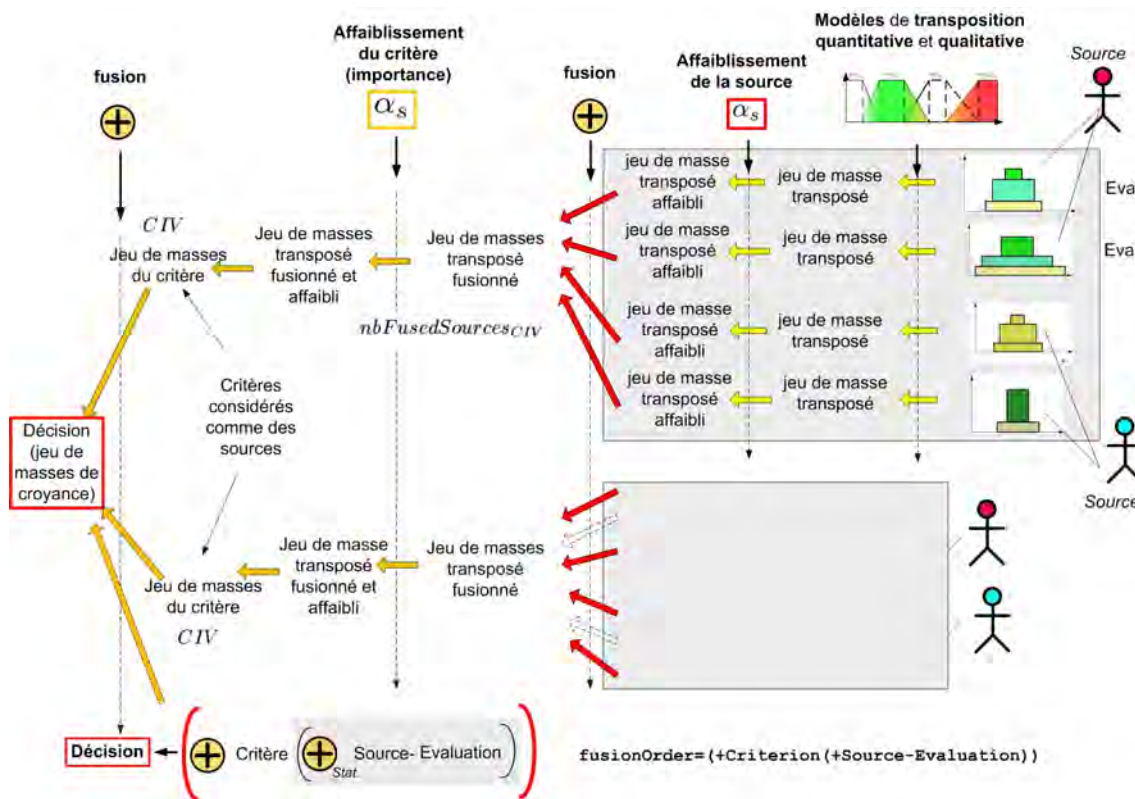


FIGURE 8.29 – Description détaillé du processus de fusion implémenté

8.5.2 Facteurs d'affaiblissement différenciés pour l'importance et la fiabilité des sources

La méthodologie *ER-MCDA* proposée combine d'une part l'analyse multicritères hiérarchique qui agrège des préférences exprimées sur des critères et, d'autre part, la fusion d'information qui s'intéresse au degré de vérité de l'information et/ou de propositions. Dans les deux cas, l'objectif est une décision consistant soit à choisir entre ou classer différentes alternatives, soit à déterminer ou identifier l'information la plus fiable. La méthodologie *ER-MCDA* repose sur deux niveaux de fusion concernant tout d'abord les évaluations plus ou moins fiables des critères fournis par les sources puis les critères eux-mêmes considérés comme des sources plus ou moins importantes (FIG. 8.30). Il en résulte une délicate question à laquelle la méthode tente de répondre : *comment associer importance et vérité de l'information dans le cadre d'un processus de fusion ?*

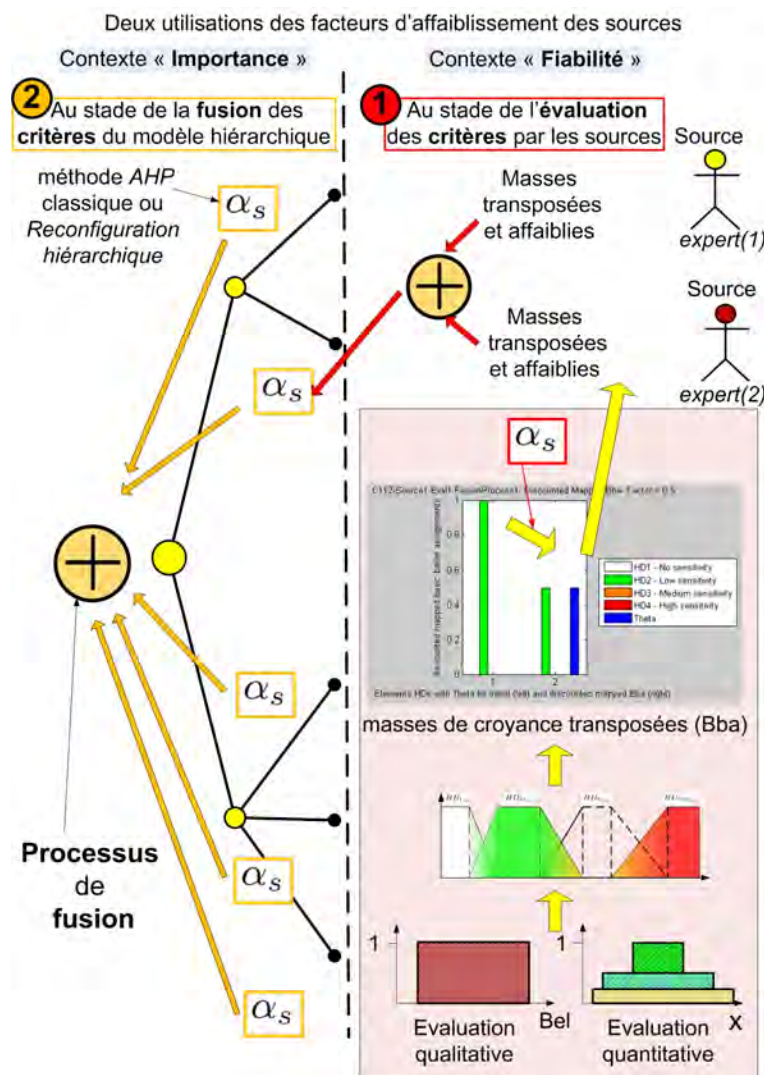


FIGURE 8.30 – Mise en œuvre des facteurs d'affaiblissement à deux niveaux de fusion dans l'approche *ER-MCDA*

Considérer les poids comme des facteurs d'affaiblissement

Dans le cadre de la fusion d'information, les facteurs d'affaiblissement sont utilisés classiquement pour prendre en compte la fiabilité des sources. Pour chaque source s_r avec $r \in \{1, 2, \dots, S\}$, α_r représente la confiance accordée par le système à la source. ($\alpha_r = 1$) correspond à une source totalement fiable, $\alpha_r = 0$ correspond à une source totalement non fiable (Dezert, 2003). Dans le cadre de la méthodologie *ER-MCDA*, ils sont mis en œuvre dans cet esprit au stade de l'évaluation des critères qualitatifs et quantitatifs. Ces facteurs d'affaiblissement sont estimés a priori pour les critères quantitatifs. Pour les critères qualitatifs, une méthode indirecte permet de les estimer à partir d'indices de confiance sur les éléments du cadre de discernement d'évaluation (voir 8.4.3)¹¹.

Au niveau de la seconde étape de fusion des critères considérés comme des sources (après transposition et fusion des évaluations), les facteurs d'affaiblissement devraient être considérés non plus en terme de fiabilité mais d'importance. A défaut de méthode adaptée, l'approche par défaut consiste néanmoins à déduire des facteurs d'affaiblissement "classiques" des poids

11. p. 207

issus de l'analyse multicritères hiérarchique (*AHP*). Ces poids sont définis pour chaque critère à l'aide de comparaisons par paires ou résultent d'une rétro-analyse de modèles existants sur la base de reconfiguration hiérarchique et de différents modèles de normalisation. Après une étape de normalisation des poids basée sur le maximum, le facteur d'affaiblissement α_r peut être défini selon la méthode proposée dans (Beynon, 2005a) sous la forme $\alpha_r = \frac{w_r}{\max(w_k)}$ with $k \in \{1, 2, \dots, S\}$ (FIG. 8.31).

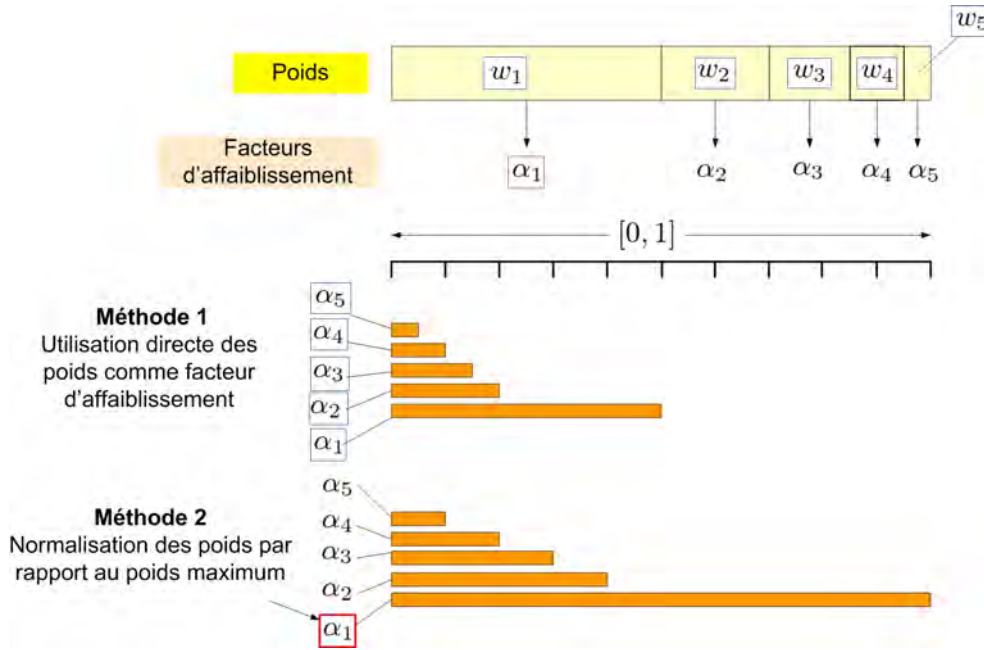


FIGURE 8.31 – Deux méthodes pour passer des préférences (poids) à un facteur d'affaiblissement

Appliquer ce facteur d'affaiblissement à un jeu de masse transposé au niveau d'un critère revient à considérer que le critère n'est pas fiable au même titre que les évaluations des sources pouvaient l'être. En fusionnant les critères de cette façon, on limite l'intérêt de la méthode en termes d'aide à la décision car le jeu de masse fusionné provient de deux logiques différentes. Cette méthode apparaît donc imparfaite et nous proposons dans la suite une alternative possible.

Peut-on traduire l'importance d'un critère par un facteur d'affaiblissement ?

Pour représenter l'importance relative d'un critère dans le même esprit que dans un problème de décision multicritères, nous proposons un facteur d'affaiblissement d'importance noté α_{Imp} . Il s'inspire du principe développé par (Smets and Kennes, 1994), qui autorise dans le cadre l'hypothèse du monde ouvert, l'affectation d'une masse de croyance non nulle sur l'ensemble vide. Pour une source \mathcal{B} décrite par un jeu de masse de croyance $m(\cdot)$ relativement au cadre de discernement Θ et utilisé dans le cadre de l'approche *ER-MCDA*¹², le facteur d'affaiblissement d'importance (expérimental) $\alpha_{Imp, \mathcal{B}}$ est défini par $\alpha_{Imp} \in]0, 1]$ tel que pour tout élément $A \subset \Theta$, la masse de croyance affaiblie par importance $m'_{Imp}(\cdot)$ est définie par (EQ. 8.5) :

$$\begin{cases} m(A) \\ m(\emptyset) \end{cases} \longrightarrow \begin{cases} m'_{Imp}(A) = \alpha_{Imp} \cdot m(A) & \forall A \neq \emptyset \\ m'_{Imp}(\emptyset) = (1 - \alpha_{Imp}) + \alpha_{Imp} \cdot m(\emptyset) \end{cases} \quad (8.5)$$

Le cas $\alpha_{Imp} = 1$ correspond à une source \mathcal{B} qui aurait la valeur maximale d'importance possible. Le principe de ce facteur d'affaiblissement d'importance est de réduire la masse de

12. Evidential reasoning - Multi-criteria decision analysis

croissance relative à un critère terminal (utilisé dans le cadre de la fusion à plat) sans accroître l'ignorance totale correspondant à $m(\Theta)$. L'idée consiste, lors de la dernière phase de fusion de l'approche *ER-MCDA*, à affaiblir une source à la fois en fonction de sa fiabilité et de son importance et d'interpréter la décision sur ces bases. Comme le principe consiste à affecter artificiellement une masse de croyance sur l'ensemble vide, cette méthode doit être utilisée dans un contexte où la masse de croyance attribuée à l'ensemble vide peut être non nulle. Les exemples suivants illustrent le principe de ce facteur d'affaiblissement d'importance dans un cas très simple d'un cadre de discernement $\Theta = \{HD_1, HD_2\}$ comprenant deux hypothèses ($Card(\Theta) = 2$) et analysé dans le cadre de la *DST* et de la *DSmT* (FIG. 8.32).

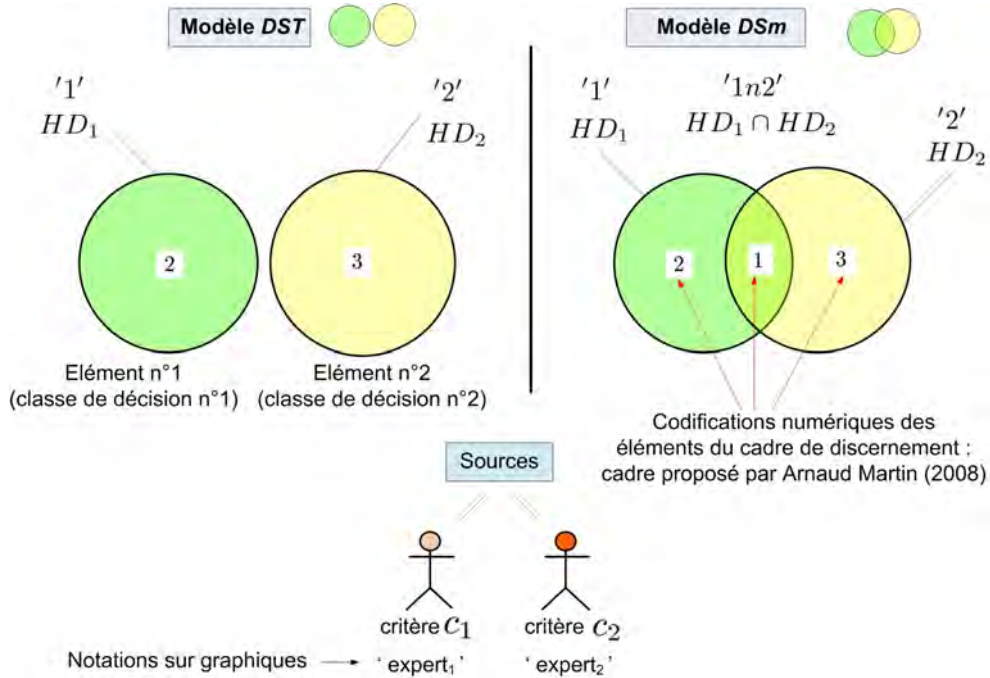


FIGURE 8.32 – Modèles *DST* et *DSmT* pour les cas de test du facteur d'affaiblissement d'importance

La source c_1 est supposée très peu fiable ($\alpha_{Rel,1} = 0.1$) mais très importante dans le cadre du processus de décision ($\alpha_{ImpRel,1} = 1$) tandis que la source c_2 est considérée comme totalement fiable ($\alpha_{Rel,2} = 1$) mais peu importante dans le processus de décision ($\alpha_{ImpRel,2} = 0.1$). Les jeux de masses de croyance correspondent aux niveaux maximum de conflit entre deux sources (FIG. 8.33). La source ou critère c_1 (peu fiable, importante dans le processus de décision) soutient totalement l'hypothèse HD_2 . La source ou critère c_2 (très fiable, peu importante dans le processus de décision) soutient totalement l'hypothèse HD_1 (FIG. 8.34).

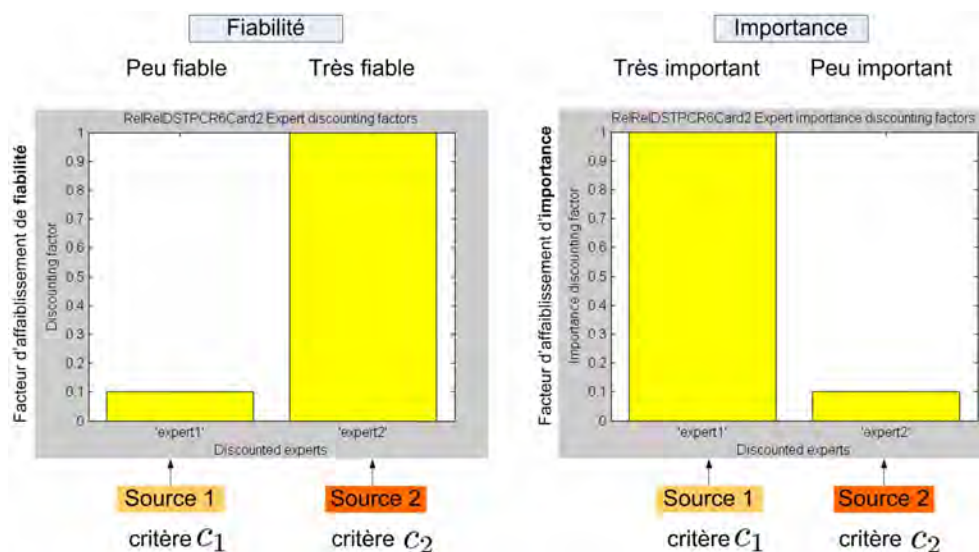


FIGURE 8.33 – Cas test : fiabilité et importance des sources (critères) c_1 and c_2

Première approche : appliquer deux fois le facteur d'affaiblissement classique

Dans un premier temps, on utilise comme base de comparaison un double affaiblissement basé sur un facteur d'affaiblissement de la fiabilité dans le contexte de la *DST* (TAB. 8.1) ou de la *DSmT* (TAB. 8.2). A partir de jeux de masse de croyance fournis par les sources c_1 et c_2 , on applique successivement un facteur d'affaiblissement (classique) interprété en terme de fiabilité (α_{Rel}) puis d'importance (α_{ImpRel}). Dans les tableaux TAB. 8.1 et TAB. 8.2, en l'absence d'autre méthode, l'affaiblissement classique correspondant à un affaiblissement de fiabilité est tout d'abord appliqué dans l'étape 2 pour prendre en compte l'importance relative des sources¹³.

13. d'où la dénomination fiabilité de cette étape dans les tableaux alors qu'il devrait s'agir d'une importance

8.5. PROCESSUS DE FUSION DES AVIS D'EXPERTS ET RÈGLE DE DÉCISION

Etapes d'affaiblissement	Source	Facteur d'affaiblissement	$\Theta = \{HD_1, HD_2\}$			
			Masses affaiblies bba			
			\emptyset	HD_1	HD_2	Θ
Initialisation	c_1	aucun	0	0	1	0
	c_2	aucun	0	1	0	0
Etape 1 : Fiabilité	c_1	$\alpha_{Rel,1} = 0.1$	0	0	0.1	0.9
	c_2	$\alpha_{Rel,2} = 1$	0	1	0	0
Etape 2 : Fiabilité	c_1	$\alpha_{ImpRel,1} = 1$	0	0	0.1	0.9
	c_2	$\alpha_{ImpRel,2} = 0.1$	0	0.1	0	0.9

Règle de fusion : Dempster

Résultat de la fusion	$c_1 \oplus c_2$	bba	0	0.0909	0.0909	0.8182
		Bel	0	0.0909	0.0909	1
		Pl	0	0.9091	0.9091	1

Règle de fusion : Smets

Résultat de la fusion	$c_1 \oplus c_2$	bba	0.01	0.09	0.09	0.81
		Bel	0.01	0.1	0.1	1
		Pl	0.01	0.9	0.9	0.99

Règle de fusion : PCR6

Résultat de la fusion	$c_1 \oplus c_2$	bba	0	0.095	0.095	0.81
		Bel	0	0.095	0.095	1
		Pl	0	0.905	0.905	1

TABLE 8.1 – Approche *ER-MCDA* - double affaiblissement (**fiabilité**) des critères c_1 et c_2 - cadre *DST*- Modèle de *Shafer*

Analyse des résultats Dans le cadre d'un modèle de Shafer (ou de la *DST*), les résultats (TAB. 8.1) montrent que le modèle ne fournit aucune information permettant de décider entre les deux hypothèses du cadre de discernement (voir aussi FIG. 8.34). L'utilisation du facteur d'affaiblissement classique (de fiabilité) pour représenter l'importance d'un critère ne permet pas de différencier importance et confiance. Dans le cadre d'un modèle libre (*DSmT*), il n'y a pas de conflit et la règle *DSmC* ne permet pas non plus de décider. Les masses fusionnées des hypothèses HD_1 et HD_2 sont égales (TAB. 8.2).

CHAPITRE 8. LA MÉTHODOLOGIE (ER-MCDA) : ANALYSE MULTICRITÈRES ET FUSION D'INFORMATION

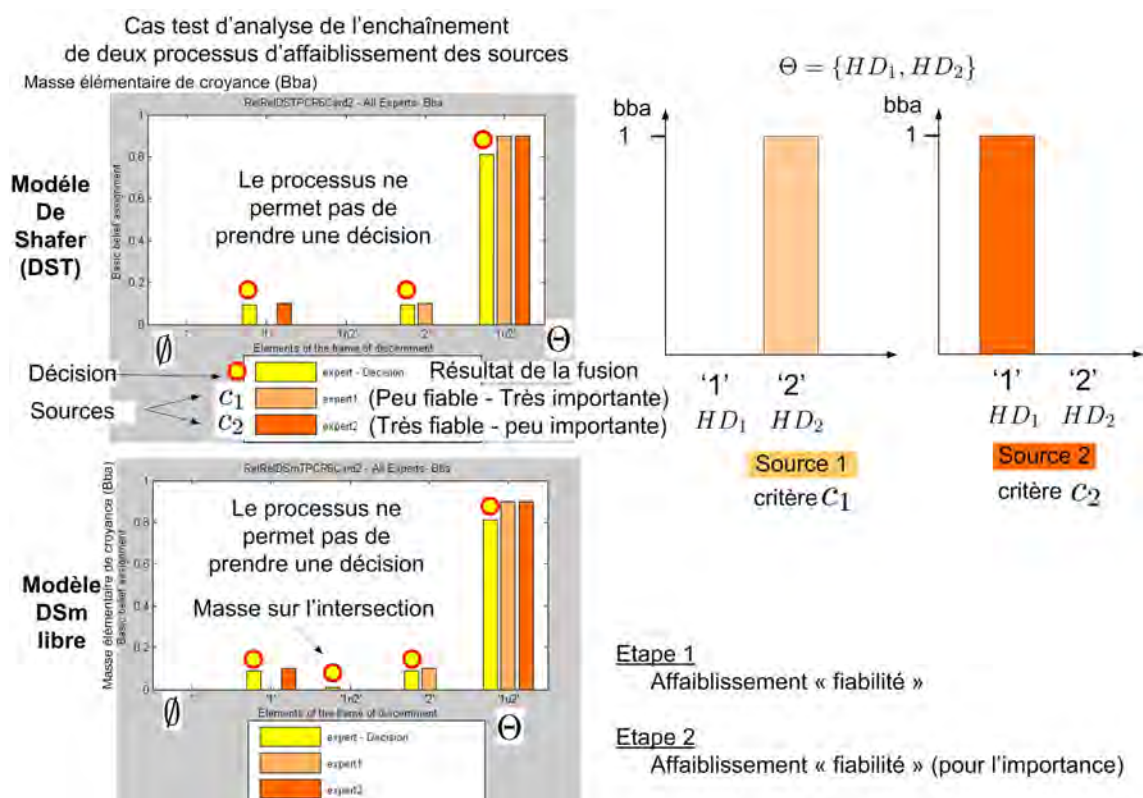


FIGURE 8.34 – Résultats des méthodes d'affaiblissement des sources : *fiabilité-fiabilité*

Etapas d'affaiblissement	Source	Facteur d'affaiblissement	$\Theta = \{HD_1, HD_2\}$				
			Masses affaiblies bba				
			\emptyset	HD_1	$HD_1 \cap HD_2$	HD_2	Θ
Initialisation	c_1	aucun	0	0	0	1	0
	c_2	aucun	0	1	0	0	0
Etape 1 : Fiabilité	c_1	$\alpha_{Rel,1} = 0.1$	0	0	0	0.1	0.9
	c_2	$\alpha_{Rel,2} = 1$	0	1	0	0	0
Etape 2 : Fiabilité	c_1	$\alpha_{ImpRel,1} = 1$	0	0	0	0.1	0.9
	c_2	$\alpha_{ImpRel,2} = 0.1$	0	0.1	0	0	0.9

Règle de fusion : DSsm

Résultat de la fusion	$c_1 \oplus c_2$	bba	0	0.09	0.01	0.09	0.81
		Bel	0	0.1	0.01	0.1	1
		Pl	0	1	1	1	1

TABLE 8.2 – Approche ER-MCDA - double affaiblissement (**fiabilité**) des critères c_1 et c_2 - cadre DSsmT - Modèle libre

Autre approche : utiliser un nouveau facteur d'affaiblissement pour l'importance

La démarche consiste ici à appliquer successivement un facteur d'affaiblissement (classique) de fiabilité puis un facteur d'affaiblissement d'importance en considérant un modèle de Shafer (*DST*) (TAB. 8.3) et un modèle libre (*DSmT*) (TAB. 8.4) et en appliquant la règle de fusion de Ph. Smets. Les résultats montrent que ce processus permet de produire une décision : l'hypothèse HD_1 (codée '1') est retenue. La fiabilité de l'information est ici privilégiée par rapport à l'importance : A masses de croyance égales, la source fiable mais peu importante détermine la décision par rapport à la source importante mais peu fiable, ce qui est un résultat cohérent avec les principes de la fusion d'information mais qui peut être discuté dans le cadre d'un véritable contexte de décision.

				$\Theta = \{HD_1, HD_2\}$			
				Masses affaiblies bba			
Etales d'affaiblissement	Source	Facteur d'affaiblissement		\emptyset	HD_1	HD_2	Θ
Initialisation	c_1	aucun		0	0	1	0
	c_2	aucun		0	1	0	0
Etape 1 : Fiabilité	c_1	$\alpha_{Rel,1} = 0.1$		0	0	0.1	0.9
	c_2	$\alpha_{Rel,2} = 1$		0	1	0	0
Etape 2 : Importance	c_1	$\alpha_{Imp,1} = 1$		0	0	0.1	0.9
	c_2	$\alpha_{Imp,2} = 0.1$		0.9	0.1	0	0

Règle de fusion : Smets

Résultat de la fusion	$c_1 \oplus c_2$	bba	0.91	0.09	0	0
		Bel	0.91	1	0	0
		Pl	0.91	0.09	0	0

TABLE 8.3 – Approche *ER-MCDA* - double affaiblissement (**Fiabilité** puis **Importance**) des critères c_1 et c_2 - cadre *DST*- Modèle de *Shafer*

CHAPITRE 8. LA MÉTHODOLOGIE (*ER-MCDA*) : ANALYSE MULTICRITÈRES ET FUSION D'INFORMATION

Etapes d'affaiblissement	Source	Facteur d'affaiblissement	$\Theta = \{HD_1, HD_2\}$				
			Masses affaiblies <i>bba</i>				
			\emptyset	HD_1	$HD_1 \cap HD_2$	HD_2	\oplus
Initialisation	c_1	aucun	0	0	0	1	0
	c_2	aucun	0	1	0	0	0
Etape 1 : Fiabilité	c_1	$\alpha_{Rel,1} = 0.1$	0	0	0	0.1	0.9
	c_2	$\alpha_{Rel,2} = 1$	0	1	0	0	0
Etape 2 : Importance	c_1	$\alpha_{Imp,1} = 1$	0	0	0	0.1	0.9
	c_2	$\alpha_{Imp,2} = 0.1$	0.9	0.1	0	0	0

Règle de fusion : DSm-Smets

Résultat de la fusion	$c_1 \oplus c_2$	<i>bba</i>	0.9	0.09	0.01	0	0
		<i>Bel</i>	0.9	1	0.91	0	0
		<i>Pl</i>	0.9	0.1	0.1	0	0

TABLE 8.4 – Approche *ER-MCDA* - double affaiblissement (**Fiabilité** puis **Importance**) des critères c_1 et c_2 - cadre *DSmT* - Modèle libre

Conclusion sur le facteur d'affaiblissement d'importance

Le facteur d'affaiblissement classique ne permet pas de différencier l'importance et la fiabilité. La méthode de double affaiblissement (fiabilité et importance) proposée envisage un transfert des masses sur Θ et l'ensemble vide \emptyset dans le cadre d'une hypothèse de monde ouvert (masse non nulle autorisée sur l'ensemble vide) et permet finalement une décision privilégiant la fiabilité de l'information à son importance. La question de la prise en compte des notions d'importance et de fiabilité dans un processus de fusion reste cependant posée. Des règles de répartition proportionnelles du type *PCR* mais adaptées à ce contexte pourraient être imaginées. De même, l'ordre de fusion peut permettre également de mieux prendre en compte cette notion d'importance.

Le processus de fusion poursuivi jusqu'à la production d'une décision (fusion de critères) n'est peut-être également pas le plus adapté. La prise en compte simultanée de l'importance et de la fiabilité des sources peut s'apparenter à un problème de décision multicritères. Pour produire une décision au stade ultime de la démarche, sur la base de critères caractérisés en terme d'importance et de fiabilité, est-ce qu'il ne faudrait pas envisager et tester une autre méthode d'aide à la décision multicritères (basée sur une agrégation totale ou partielle) considérant la qualité de l'information comme un nouveau critère ?

8.6 Conclusion

Associer imperfection de l'information et décision

Le principe de la méthode Une problématique de décision consiste soit à choisir, classer, trier des alternatives ou actions entre elles. La méthodologie proposée, dénommée *ER-MCDA*, consiste à définir des classes de décision et à analyser comment l'information disponible, imparfaite et provenant de sources hétérogènes, inégalement fiables et potentiellement conflictuelles, permet de soutenir le rattachement d'une alternative aux classes de décision. Elle associe plusieurs cadres théoriques de manipulation et traitement de l'information imparfaite et l'analyse

multicritères hiérarchique. Les alternatives peuvent être évaluées (en vue de prendre une décision) en considérant l'importance relative des critères, la nature imprécise et incertaine des informations, la fiabilité et les contradictions entre des sources d'information. L'analyse multicritères hiérarchique sert de support conceptuel pour formuler hiérarchiquement le problème de décision et déterminer les préférences entre critères. La méthode d'agrégation de l'*AHP* n'est pas utilisée pour produire une décision.

Les théories des ensembles flous, des possibilités et des fonctions de croyance permettent de prendre en compte le caractère imparfait de l'information et de transposer les évaluations de critères qualitatifs et quantitatifs dans un cadre de discernement de décision commun, obligatoire pour procéder à une fusion d'information. Des distributions de possibilités sont utilisées pour évaluer les critères quantitatifs sous forme d'intervalles numériques sur lesquels l'expert (la source) définit un niveau de confiance grâce à une mesure subjective de nécessité. Cette distribution permet ensuite d'obtenir des masses de croyances en exploitant les correspondances entre les mesures de crédibilité, plausibilité et respectivement nécessité, possibilité. Des intervalles flous permettent d'établir une correspondance ou transposition entre les évaluations des critères et les classes d'évaluation (éléments) du cadre de discernement de décision commun. Dans leur principe, les modèles de "transposition" jouent le même rôle qu'une fonction d'utilité dans le cadre des méthodes multicritères d'agrégation totale. Ils transforment dans un cadre commun des évaluations de critères de nature et de portée totalement différentes.

De nombreux processus de fusion En première approche, la méthodologie *ER-MCDA* est basée sur deux phases de fusion successives concernant d'abord les évaluations puis les critères. La fusion est réalisée dans le cadre de la théorie des fonctions de croyance au travers des théories de *Dempster-Shafer (DST)* et de *Dezert-Smarandache (DSmT)*. Les évaluations transposées, éventuellement affaiblies en fonction de la fiabilité des sources et correspondant aux critères quantitatifs et qualitatifs, sont fusionnées entre elles au niveau de chaque critère. Un jeu de masses fusionnées, exprimé dans le cadre de discernement commun est donc obtenu au niveau de chaque critère, dont l'importance, a été préalablement déterminée à partir de l'analyse multicritères hiérarchique. Lors d'une seconde étape de fusion, les critères, considérés comme des sources, sont également fusionnés pour produire un jeu de masses de croyance réparties entre les classes d'évaluation du cadre de discernement de décision commun. Il est alors possible de choisir la classe retenue selon des principes de choix plus ou moins optimistes ou pessimistes au travers du maximum de masse, du maximum de crédibilité, de plausibilité, de probabilité pignistique.

Dans le cadre de la méthodologie, de nombreux processus de fusion peuvent être définis notamment en fonction des choix de modélisation du cadre de discernement de décision commun, du cadre de discernement d'évaluation des critères qualitatifs, des règles de fusion, de l'ordre de fusion respectifs des évaluations, des critères

Une triple formulation du problème

La méthodologie repose sur trois niveaux de formulation du problème :

1. le premier niveau correspond à la formalisation et à la structuration hiérarchique du problème de décision. L'analyse multicritères hiérarchique, mise en œuvre dans le cadre d'une approche *critère-estimateur-solution*, permet l'identification de critères quantitatifs ou qualitatifs et la valuation des préférences sous forme de pondérations. La structure hiérarchique est ensuite transformée en une structure "à plat" sans hiérarchie correspondant à une série de critères dotés de pondérations agrégés¹⁴. Les développements relatifs au diagnostic et à la reconfiguration de modèles sont donc exploités à nouveau pour cette fois-ci passer d'une structure hiérarchique à une structure à plat, compatible avec la fusion.

14. selon les principes détaillés dans le chapitre 7, p. 140

2. le second niveau concerne la définition du cadre de discernement de décision commun correspondant aux classes d'évaluation de la décision. La décision porte sur le choix d'une de ces classes d'évaluation $\{HD_1, \dots, HD_k, \dots, HD_{GD}\}$. Chacune des sources du processus de fusion doit exprimer un jeu de masse de croyance relativement à ces classes d'évaluation.
3. le troisième niveau ne concerne que les classes d'évaluation de critères qualitatifs. Il s'agit ici d'établir une correspondance entre l'évaluation de classes d'évaluation pouvant ne pas être exclusives et le cadre de décision. Un modèle d'évaluation qualitative permet de représenter l'appartenance partielle à chacune des classes.

Les cadres théoriques de la *DST* et de la *DSmT*

Divers travaux ont proposé l'association de méthodes d'aide multicritères à la décision et de théories prenant en compte l'imperfection de l'information. Celles qui ont envisagé l'utilisation de la théorie des fonctions de croyance n'ont exploité que le cadre de la théorie de *Dempster-Shafer* dont les limites sont connues pour représenter des informations vagues et paradoxales ou conflictuelles. Dans notre approche, nous avons envisagé les cadres de la théorie de *Dempster-Shafer* (*DST*) et le cadre plus récent de la théorie de *Dezert-Smarandache* (*DSmT*).

A ce stade, les théories de *Dempster-Shafer* (*DST*) et de *Dezert-Smarandache* (*DSmT*) ne sont exploitées qu'au travers de la formulation du problème et de la modélisation des cadres de discernement. Dans son principe, la théorie *DSmT* n'exige pas l'exclusivité des hypothèses du cadre de discernement et présente du même coup deux avantages dans le cadre de la méthodologie proposée. Au niveau du cadre de discernement de décision commun, elle permet de représenter de façon plus réaliste les transitions entre des classes d'évaluation de la décision (passage d'une catégorie faible à moyenne, forte). Au niveau des critères qualitatifs, un modèle d'évaluation basé sur un cadre de discernement conçu dans le cadre théorique de la *DSmT* permet de représenter des appartenances variables à chacune des classes et à leurs intersections. Par exemple, on peut imaginer de s'intéresser au rôle fonctionnel d'un équipement par rapport à des fonctions de secours, de communication sachant qu'il peut exister des équipements qui assurent ces deux fonctions simultanément. Dans le même temps, l'évaluation du rôle de ces fonctions peut être plus ou moins incertaine : on peut être certain que cet équipement va avoir une fonction de secours mais être moins catégorique sur la fonction simultanée de communication et de secours (par exemple parce que l'équipement n'est pas essentiel, peut être remplacé ...). Le cadre de la *DSmT*, comme montré dans l'application, permet de modéliser ce type de situation alors que la théorie de la *DST* ne le permet pas par principe. L'application mettra en évidence d'autres avantages liés à une meilleure gestion du conflit garantissant une meilleure représentativité des résultats de la fusion.

Les modèles de transposition sont les points-clés de la méthodologie

L'agrégation multicritères résulte du besoin de combiner des critères différents contribuant à une même décision. Pour fusionner des informations, il faut au contraire que les informations se réfèrent à un cadre de discernement commun par rapport auquel chaque source doit exprimer des jeux de masse de croyance. Pour exploiter des avantages respectifs des deux approches dans un même cadre, il faut donc trouver un moyen de transformer ou "transposer" des évaluations numériques ou des évaluations qualitatives dans un même cadre. Cette étape constitue un des points essentiels de la démarche.

Des modèles de transposition sont développés pour établir cette correspondance entre les évaluations des critères quantitatifs et qualitatifs, issues de sources de fiabilité variable, avec un cadre de décision commun basé sur les théories de *Dempster-Shafer* (*DST*) ou de *Dezert-Smarandache* (*DSmT*). Les méthodes utilisées pour établir ces correspondances constituent,

dans le cadre quantitatif et qualitatif, une première série de réponses à ce qui est longtemps resté un problème dans le développement de cette méthodologie. Dans le cadre quantitatif, la transposition utilise des distributions de possibilités et repose finalement sur un principe d'équivalence géométrique très simple qui établit la connexion entre des domaines d'évaluation des critères et un référentiel de décision. Dans le cadre qualitatif, la transposition n'utilise plus directement des grandeurs numériques mais un intervalle de valeurs hautes et basses de crédibilité reposant sur un modèle d'évaluation et un cadre de discernement propre à chaque critère qualitatif. Les solutions proposées restent certainement perfectibles et posent un certain nombre de questions notamment sur les liens entre les différents formalismes théoriques et sur la validité des transferts de masse de croyance entre des intervalles numériques et des classes d'évaluation représentées par des intervalles flous. Pour faire évoluer la méthodologie, son principe et sa structuration séquentiels restent cependant des atouts.

Des processus d'évaluation et de traitement séquentiels et dissociés

Pour répondre à la problématique de caractérisation de l'incertitude et d'amélioration de la traçabilité de l'expertise, cette méthodologie aboutit notamment à une dissociation de l'évaluation des critères et de l'exploitation dans le cadre d'une décision. Les modèles de transposition qualitative et quantitative expriment, pour chaque critère, le lien imaginé par l'expert analyste entre les grandeurs mesurées ou classes considérées et les classes d'évaluation de la décision. L'évaluation, la transposition, la fusion sont des étapes séquentielles et indépendantes. De par sa conception, les différentes phases de la méthodologie pourront être améliorées et approfondies de manière indépendante. Ce mode opératoire séquentiel permet de faire co-exister les approches et les cadres de raisonnement. Il comprend ainsi :

- la définition des cadres de discernement de décision et d'évaluation qualitative dans le cadre de la *DST* et de la *DSmT* ;
- les choix de modèles de transposition quantitative et qualitative basés sur l'utilisation des théories des ensembles flous, des possibilités et des fonctions de croyance ;
- la définition des modèles d'évaluation qualitative permet d'une part, de considérer une confiance partielle des sources dans leur évaluation et, d'autre part, de produire un intervalle de mesures hautes et basses de crédibilité compatibles avec les modèles de transposition qualitative ;
- l'utilisation des facteurs d'affaiblissement et des pondérations pour prendre en compte à la fois l'*importance* et la *vérité* de l'information dans le processus de décision : ce point constitue un verrou méthodologique essentiel de la méthode.

Cette méthodologie est mise en application sur un problème de décision simplifié (voir 9.1, p. 223).

Un verrou subsiste : distinguer l'importance et l'incertitude

Un processus de fusion d'information permet de combiner des informations incertaines, paradoxales provenant de sources plus ou moins fiables mais s'exprimant sur un cadre de décision commun nommé cadre de discernement. Il s'agit donc avant tout de déterminer un niveau de "vérité" associé à chacun des éléments focaux de ce cadre global. L'agrégation multicritères cherche, quant à elle, à identifier une décision résultant d'un compromis entre des évaluations de critères quantitatifs ou qualitatifs, exprimées sur des grandeurs dont la nature, les échelles et les unités sont différentes. Chacun de ces critères est plus ou moins important dans le processus de décision. En associant l'analyse multicritères et la fusion d'information, l'objectif est de pouvoir différencier par exemple, un critère peu important dont l'évaluation est certaine d'un critère très important mais dont l'évaluation est incertaine.

La fusion d'information permet classiquement de prendre en compte la fiabilité d'une source en affaiblissant les jeux de masses de croyance puis en affectant les masses sur l'ignorance totale. Les sources d'évaluation des critères sont affaiblies selon ce principe.

L'appliquer pour caractériser une importance, comme proposé dans la littérature, n'apparaît pas totalement satisfaisant. L'utiliser au titre d'une différence d'importance conduit en fait à augmenter l'ignorance quand l'importance décroît. Ceci pose donc le problème de la prise en compte spécifique de l'importance et de la confiance dans un calcul de fusion. Pour tenter de résoudre cette difficulté, une première approche très simple et imparfaite est proposée, pour affaiblir les masses en affectant une partie de ces masses sur l'ensemble vide. Le développement de nouvelles règles de fusion proportionnelles ou l'exploitation de règles pondérées existantes est certainement une piste à explorer. Néanmoins, en admettant, que l'on puisse différencier importance et confiance entre les critères, il demeurera un délicat problème d'interprétation : comment va t'on décider et choisir entre importance et confiance dans l'évaluation ? Comment va t'on décider sur la base de deux critères dont l'un est important mais dont l'évaluation est peu fiable et un critère peu important avec une information fiable ? Ces deux critères ne sont peut-être tout simplement pas comparables ouvrant ici une perspective vers l'utilisation des méthodes d'agrégation partielle pour exploiter des résultats de fusion.

Chapitre 9

Application de la nouvelle méthodologie *ER-MCDA*

Introduction

Ce chapitre constitue une application de la méthodologie *ER – MCDA* qui exploite d’une part, les principes de structuration et de normalisation utilisés pour le diagnostic et la reconfiguration de modèles hiérarchiques (chap. 7, p. 140) et, d’autre part, le cadre associant l’analyse multicritères hiérarchique et la fusion d’information (chap. 8, p. 179).

A partir d’un exemple simplifié, les différentes étapes de la méthodologie sont décrites et accompagnées, le cas échéant, d’applications numériques. Les phases décrites sont les suivantes :

- la formulation hiérarchique du problème de décision ;
- la détermination des pondérations agrégées caractérisant l’importance des critères ;
- l’évaluation imprécise d’un critère quantitatif par une source, sa transposition dans le cadre de discernement commun de décision et la fusion de masses transposées ;
- l’évaluation imprécise d’un critère qualitatif en considérant deux modèles d’évaluation qualitative (cadre de la *DST* et de la *DSmT*), sa transposition dans le cadre commun de discernement ;
- la fusion des jeux de masses de croyance exprimés au niveau des critères, chacun d’entre eux étant considéré comme une source dans le processus de fusion aboutissant à la décision.

Des résultats numériques complémentaires pour les autres critères du modèle simplifié et des détails de l’implémentation informatique peuvent être trouvés en annexe I, p. 389.

9.1 Modèle simplifié d’analyse de la sensibilité d’un site d’avalanches

Le cadre d’application correspond ici à la version simplifiée et fictive du modèle d’évaluation de la sensibilité au risque d’avalanche considéré dans le cadre d’une expertise multiple. Une première phase concerne l’identification des critères (quantitatifs, qualitatifs) et l’explicitation des priorités (ou préférences) entre critères dans le cadre d’une approche multicritères hiérarchique basée sur une approche *critère-estimateur-solution*. La seconde phase concerne le volet de la méthodologie relatif à la mise en œuvre de la fusion.

9.1.1 Description du modèle simplifié d’évaluation de la sensibilité au risque d’avalanche

Pour identifier les zones les plus exposées au risque d’avalanche, les décideurs cherchent à évaluer le niveau d’exposition au risque de chaque site en fonction de critères liés au phénomène

d'avalanche (*Aléa*) et aux enjeux exposés (*Vulnérabilité*) (FIG. 9.1).

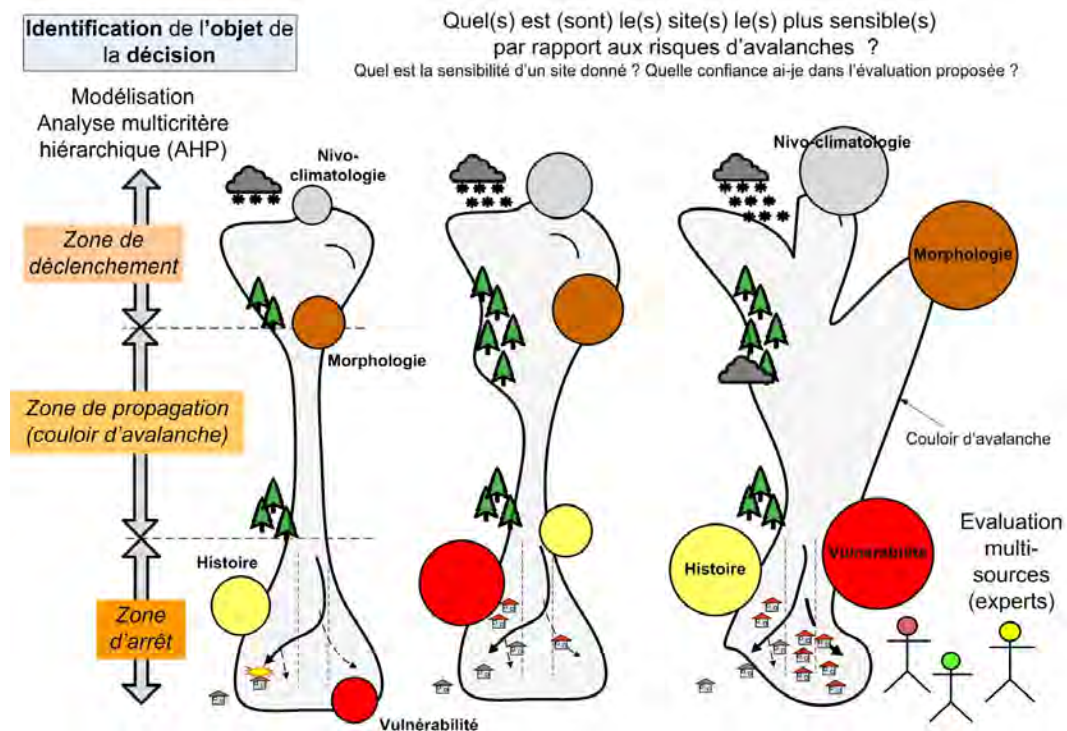


FIGURE 9.1 – Contextes de décision et d'application simplifiés : définition de l'exposition d'un site au risque d'avalanche

Une classification basée sur cette évaluation peut ensuite permettre de définir des priorités d'intervention et informer les collectivités. Nous présentons ici une version simplifiée d'un système d'aide à la décision existant dénommé *Sites Sensibles Avalanches (SSA)* (Rapin et al., 2004; Rapin, 2007). Notre application illustre comment plusieurs avis d'expert produisant des évaluations incertaines et imprécises de critères quantitatifs et qualitatifs peuvent être utilisés pour définir le niveau de sensibilité (ou d'exposition au risque) d'un site avalancheux.

Structure hiérarchique et description des critères

Le modèle hiérarchique exemple comprend 3 niveaux et 5 critères terminaux. La racine *C1* de ce modèle constitue la décision représentée par un niveau de sensibilité pouvant être soit nul, faible, modéré ou fort (FIG. G.11, p. 374). Le principe de l'évaluation est basé sur une formulation classique du risque présentée en (FIG. 2.7) ¹. La sensibilité est évaluée selon 2 sous-critères correspondant à la *vulnérabilité* (*C11*) et à l'*aléa* (*C12*). Le critère de vulnérabilité est décomposé en deux sous-critères terminaux correspondant à des *occupants hivernaux permanents* (*C111*) et à des *infrastructures* telles que des équipements industriels, collectifs ou de secours (*C112*). Le critère relatif à l'aléa est décomposé selon 3 sous-critères terminaux correspondant à la *morphologie* (*C121*), l'*histoire* ou la fréquence (*C122*) et les conditions *nivo-climatologiques* du site (*C123*). Les critères terminaux sont évalués dans un modèle *critère-estimateur-solution* (FIG. 7.12) ² : chaque solution, correspondant à un site dans notre cas, fait l'objet d'une évaluation indépendante des autres solutions envisagées.

1. p. 27

2. p. 150

9.1. MODÈLE SIMPLIFIÉ D'ANALYSE DE LA SENSIBILITÉ D'UN SITE D'AVALANCHES

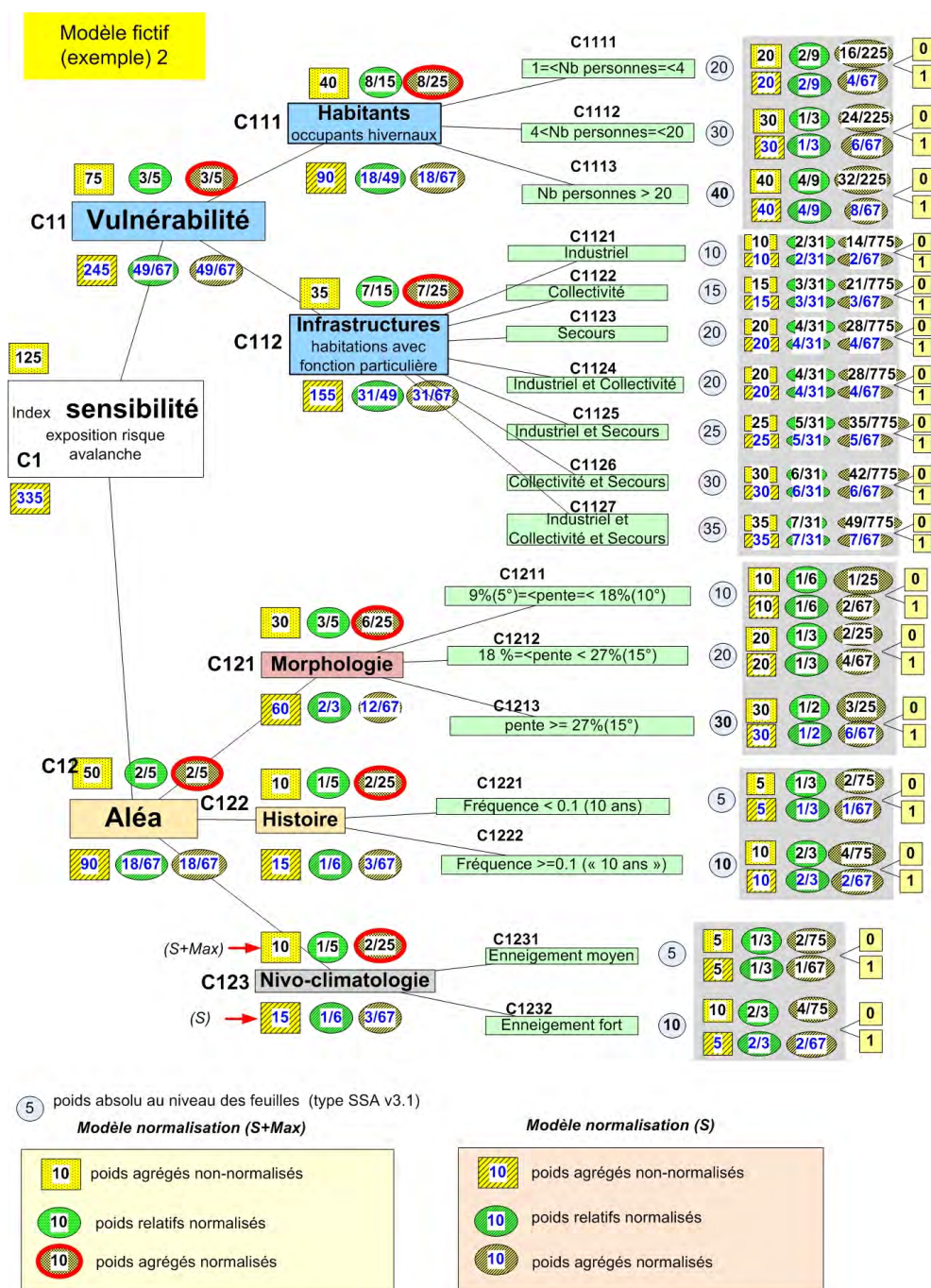


FIGURE 9.2 – Modèle hiérarchique simplifié d'analyse de la sensibilité au risque d'avalanche

L'évaluation des 5 critères terminaux est faite selon les hypothèses suivantes :

- le critère quantitatif correspondant aux *occupants permanents hivernaux* est évalué selon un nombre d'occupants (3 niveaux d'évaluation dans la version initiale) ;
- le critère *infrastructures* (C112) est considéré comme un critère qualitatif évalué selon 7 classes d'évaluation correspondant aux équipements localisés dans la zone étudiée ;
- le critère quantitatif *morphologie* (C121) est évalué selon une valeur de pente ;
- le critère quantitatif *histoire* (C122) est évalué par une valeur de fréquence empirique (représentative d'une période de retour) ;
- le critère quantitatif *nivo-climatologie* (C123) est évalué par une hauteur d'enneigement moyen.

Contrairement au modèle initial, dans lequel l'évaluation consiste à identifier l'appartenance à une classe, la méthodologie *ER – MCDA* introduit et permet l'évaluation directe sous forme d'une grandeur mesurée ou estimée. Les classes du modèle initial ne sont utilisées que pour construire les modèles de transposition qualitatifs et quantitatifs. Ces modèles de transposition permettent d'établir le lien avec entre les évaluations faites par les sources (experts, observateurs) et les classes d'évaluation de la décision (*sensibilité faible, modérée ...*). Les critères quantitatifs sont quant à eux évalués selon une procédure spécifique permettant de prendre en compte la confiance dans l'évaluation.

Tout comme le nombre de critères particulièrement réduit, il convient de noter que les valeurs numériques utilisées dans ce modèle sont fictives et extrêmement simplifiées (gamme de valeurs de pentes par exemple) et ne correspondent que de façon très approximative au modèle original. Elles ne traduisent en aucun cas une quelconque réalité et pratique de terrain et d'expertise.

Evaluation de l'importance des critères : origine des pondérations

La fusion des critères considérés comme des sources nécessite d'*aplatir* le modèle hiérarchique. Dans un modèle à plat, tous les critères terminaux sont envisagés au même niveau sous une représentation compatible avec le principe d'une fusion statique (et simultanée de tous ces critères). On vérifie que les pondérations agrégées au niveau des critères (cerclées de rouge) sont les mêmes dans le modèle à plat (FIG. 9.3) et le modèle sous sa forme hiérarchique (FIG. G.11)³.

Dans un modèle hiérarchique classique, les poids relatifs sont calculés de la racine vers les feuilles en effectuant des comparaisons par paires entre critères du même niveau. Les poids agrégés sont ensuite calculés à chaque niveau en multipliant le poids relatif du critère du niveau considéré par le poids agrégé du critère père. Dans le cas de modèles hiérarchiques existants ou de modèles empiriques à plat reconfigurés, on peut imaginer plusieurs modes de normalisation permettant de définir les poids relatifs et agrégés à chaque niveau de la hiérarchie (voir section 7.2.2)⁴. Le modèle simplifié est supposé ne pas avoir été conçu dès le début explicitement comme une structure hiérarchique. Au contraire, des poids absolus ont été attribués aux classes d'évaluation des critères terminaux.

Pour transformer ces valeurs de poids absolus en des valeurs de poids normalisés et les propager vers les différents niveaux de la hiérarchie, plusieurs principes de normalisation peuvent être utilisés. Dans cette application basée sur un modèle *critère-estimateur-solution*, on utilise le modèle *SommeMax* (*SumMax*) qui tolère des nombres variables de classes d'évaluation pour chaque critère : les poids absolus définis au niveau des classes d'évaluation sont normalisés en utilisant la somme (*Somme*). Le poids absolu retenu au niveau du critère terminal correspond au maximum (*Max*) de ces poids absolus. La normalisation est ensuite effectuée sur la base d'une somme vers la racine. A partir des poids relatifs, on peut ensuite calculer des poids agrégés de la racine vers les feuilles de l'arbre. Ce sont finalement ces poids agrégés qui sont utilisés pour calculer les facteurs d'affaiblissement d'importance des critères. Par exemple, la valeur 20 a été attribuée à la classe d'évaluation *C1111* correspondant à une classe de nombre d'occupants hivernaux compris entre 1 et 4 personnes. Les classes *C1112* et *C1113* ont des poids absolus de 30 et 40. Ceci conduit finalement à un poids agrégé du critère *C111* égal à $\frac{8}{25}$ (voir détail sur la FIG. G.12⁵).

3. p. 374

4. p. 154

5. p. 375

9.1. MODÈLE SIMPLIFIÉ D'ANALYSE DE LA SENSIBILITÉ D'UN SITE D'AVALANCHES

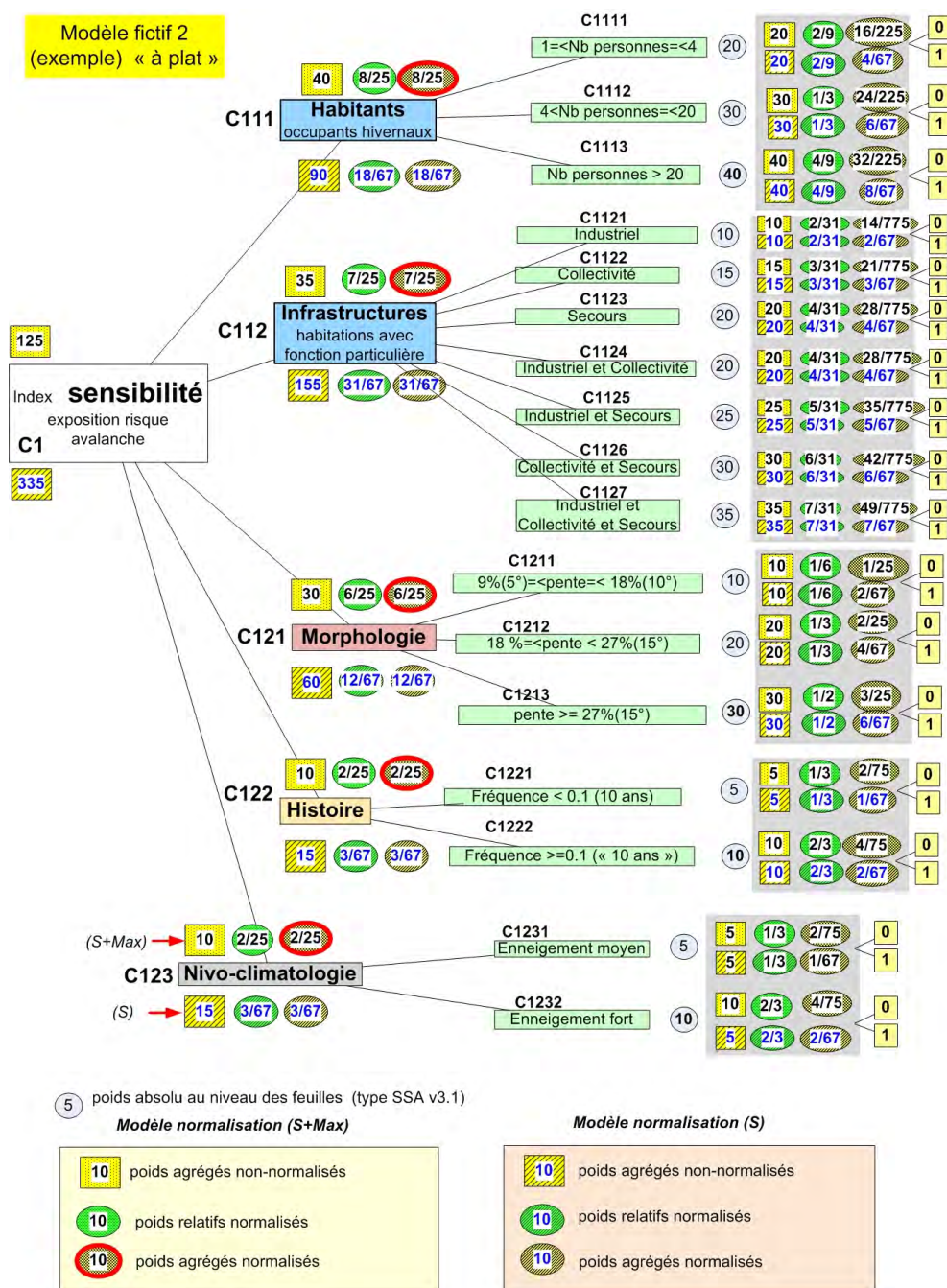


FIGURE 9.3 – Vision à *plat* du modèle simplifié d'analyse de la sensibilité au risque d'avalanche

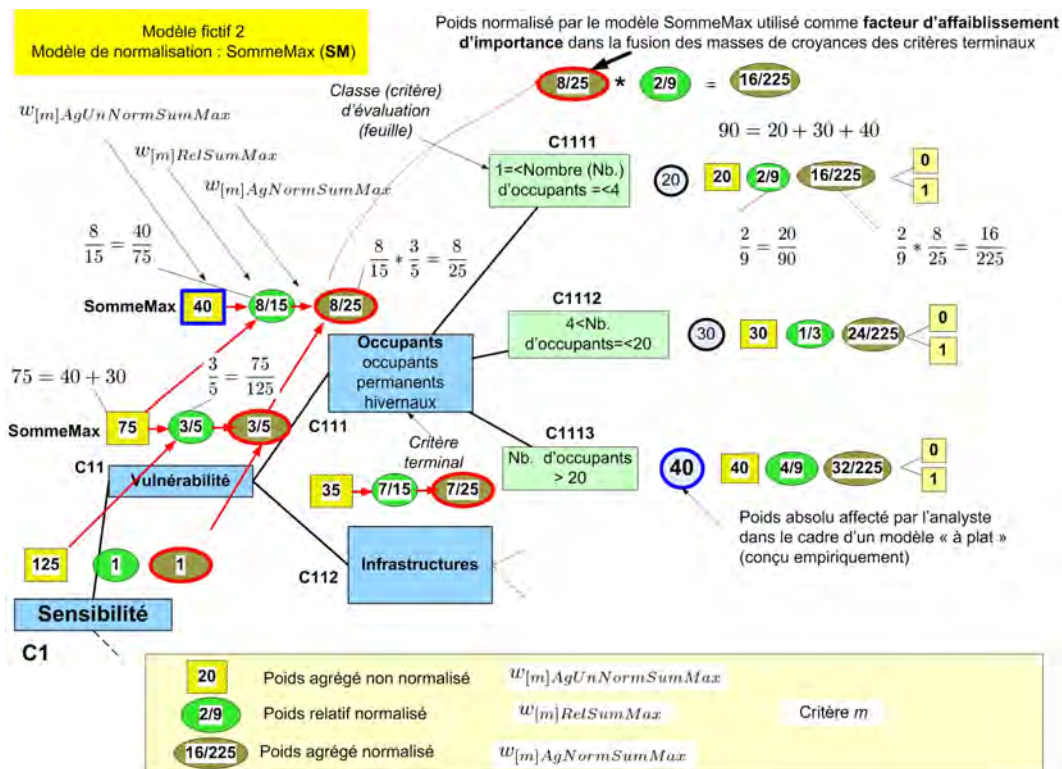


FIGURE 9.4 – Passage du poids agrégé normalisé (*SommeMax*) au facteur d'affaiblissement d'importance - critère C111

L'outil informatique développé calcule l'ensemble des poids selon les différentes méthodes de normalisation pour les critères du modèle hiérarchique simplifié (FIG. 9.5).

Array Editor - C111		Array Editor - C112	
Field	Value	Field	Value
criterionNumber	3	criterionNumber	4
arrayCIV	[1 1 1]	arrayCIV	[1 1 2]
HierarchyLevel	3	HierarchyLevel	3
parentIndexCIV	11	parentIndexCIV	11
type	'basic-level'	type	'basic-level'
nbEval	3	nbEval	7
code	'C111'	code	'C112'
name	'Occupants'	name	'LivingPlaces'
InputRelAHPWeight	0.75	InputRelAHPWeight	0.25
AgNormAHPWeight	0.42857	AgNormAHPWeight	0.14286
st	<1x3 cell>	st	<1x7 cell>
vectorEval	[0 0 0]	AgUnNormSumWeight	155
AgUnNormSumWeight	90	AgUnNormMaxWeight	35
AgUnNormMaxWeight	40	AgUnNormSumMaxWeight	35
AgUnNormSumMaxWeight	40	AgUnNormSumMaxLeafWeight	35
AgUnNormSumMaxLeafWeight	40	RelSumWeight	0.63265
RelSumWeight	0.36735	RelMaxWeight	0.875
RelMaxWeight	1	RelSumMaxWeight	0.46667
RelSumMaxWeight	0.53333	RelSumMaxLeafWeight	0.46667
RelSumMaxLeafWeight	0.53333	AgNormSumWeight	0.46269
AgNormSumWeight	0.26866	AgNormMaxWeight	0.875
AgNormMaxWeight	1	AgNormSumMaxWeight	0.28
AgNormSumMaxWeight	0.32	AgNormSumMaxLeafWeight	0.28
AgNormSumMaxLeafWeight	0.32	fusionP	<1x20 cell>
fusionP	<1x20 cell>	nbMappingModel	1
nbMappingModel	1	dataType	'quantitative'
dataType	'quantitative'		

Poids agrégé normalisé (modèle SommeMax) → 0.32 = 8/25

0.28 = 7/25

FIGURE 9.5 – Implémentation informatique et codification des données du modèle hiérarchique multicritères

9.1. MODÈLE SIMPLIFIÉ D'ANALYSE DE LA SENSIBILITÉ D'UN SITE D'AVALANCHES

Ces poids agrégés sont utilisés pour déterminer les facteurs d'affaiblissement d'importance mis en œuvre dans le cadre de la fusion. Par exemple, le poids agrégé du critère C_{111} égal à $\frac{8}{25}$ correspond au maximum des poids agrégés. Son facteur d'affaiblissement vaut 1. Pour le critère C_{112} , le facteur d'affaiblissement vaut $0.875 = \frac{7}{8}$ (voir 8.5.2, p. 211). Les facteurs d'affaiblissement d'importance pour le modèle simplifié considéré s'établissent finalement comme indiqué sur la FIG. 9.6).

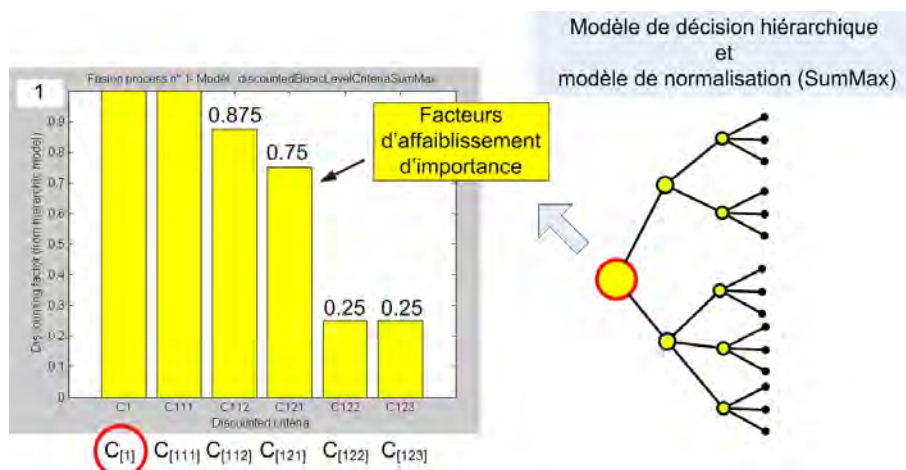


FIGURE 9.6 – Facteurs d'affaiblissement pour la fusion des critères déduits des poids normalisés

Sur la base de la structure hiérarchique du modèle, la méthodologie est mise en œuvre pour tous les critères terminaux. Nous ne détaillons ici que les deux critères C_{111} et C_{112} respectivement de type quantitatif et qualitatif. Pour chaque critère, on décrit les processus d'évaluation, la transposition vers le cadre de discernement commun de décision et enfin le processus de fusion.

9.1.2 Exemple de résultats détaillés pour un critère quantitatif : $C_{[111]}$

Le critère $C_{[111]}$ est un critère quantitatif correspondant à la vulnérabilité des occupants permanents hivernaux dans la zone étudiée.

Intervalles d'évaluation

Pour chaque source, l'évaluation est fournie sous la forme d'intervalles numériques correspondant au nombre d'occupants. La première étape consiste à définir des intervalles associés à des niveaux de confiance (FIG. 9.7). Ces niveaux de confiance interprétés comme des mesures de nécessité sont transformés en masses de croyance (bba). L'étape suivante concerne le processus de transposition (quantitative) basée sur des comparaisons de surface : les masses de croyance correspondant à chacun des intervalles sont transposées sur les éléments du cadre de discernement de décision, correspondant au modèle retenu dans le cadre de la DST ou de la $DSmT$. Le jeu de masses de croyance transposées pour la première évaluation ($eval_1$), incluant 3 intervalles, de source 1 est décrit dans le tableau TAB. 9.2 et représenté graphiquement dans la FIG. 9.9. Le principe du calcul et le résultat fourni par l'application de calcul est présenté sur la FIG. 9.8. Pour une source donnée et ses intervalles d'évaluation, plusieurs modèles de transposition peuvent exister. Nous ne présentons ici que des résultats partiels pour un modèle de transposition dans le cadre de la DST .

		Source s codée par $(C_{[111]}, Src_1, Eval_1)$							
		intervalle x_{Inf}		intervalle x_{Sup}		Nécessité		bba	
Int.	Code	Code	Valeur	Code	Valeur	Code	Valeur	Code	Valeur
1	$I(s, 1)$	$x_{Inf(s,1)}$	10	$x_{Sup(s,1)}$	12	$N_{s,I(s,1)}$	0.5	$m_{s,I(s,1)}$	0.5
2	$I(s, 2)$	$x_{Inf(s,2)}$	8	$x_{Sup(s,2)}$	15	$N_{s,I(s,2)}$	0.75	$m_{s,I(s,2)}$	0.25
3	$I(s, 3)$	$x_{Inf(s,3)}$	6	$x_{Sup(s,3)}$	20	$N_{s,I(s,3)}$	1	$m_{s,I(s,3)}$	0.25

TABLE 9.1 – Critère $C_{[111]}$ - Source 1 - Evaluation n°1 - Mesures de nécessité et masses de croyance (bba)

Transposition quantitative dans le cadre de *DST* (*DST* mapping)

Dans le cadre de la *DST*, le cadre de discernement de décision $\Theta_{Decision} = \{HD_1, HD_2, HD_3, HD_4\}$ se compose de 4 classes d'évaluation qualitative de la sensibilité au risque d'avalanche considérées comme exclusives et définies de la manière suivante $HD_1 =$ 'Pas de sensibilité', $HD_2 =$ 'Faible sensibilité', $HD_3 =$ 'Sensibilité modérée', $HD_4 =$ 'Forte sensibilité' (voir 8.2.2⁶ et FIG. 8.5).

Chaque source fournit une évaluation des critères quantitatifs sous forme d'intervalles d'évaluation emboîtés (distribution de possibilité). Pour chaque intervalle j , la source s fournit une mesure de nécessité $N_{s,I(s,j)}$ correspondant à la confiance minimale dans le fait que la valeur du critère soit entre les bornes inférieures et supérieures de l'intervalle (FIG. 9.7) .

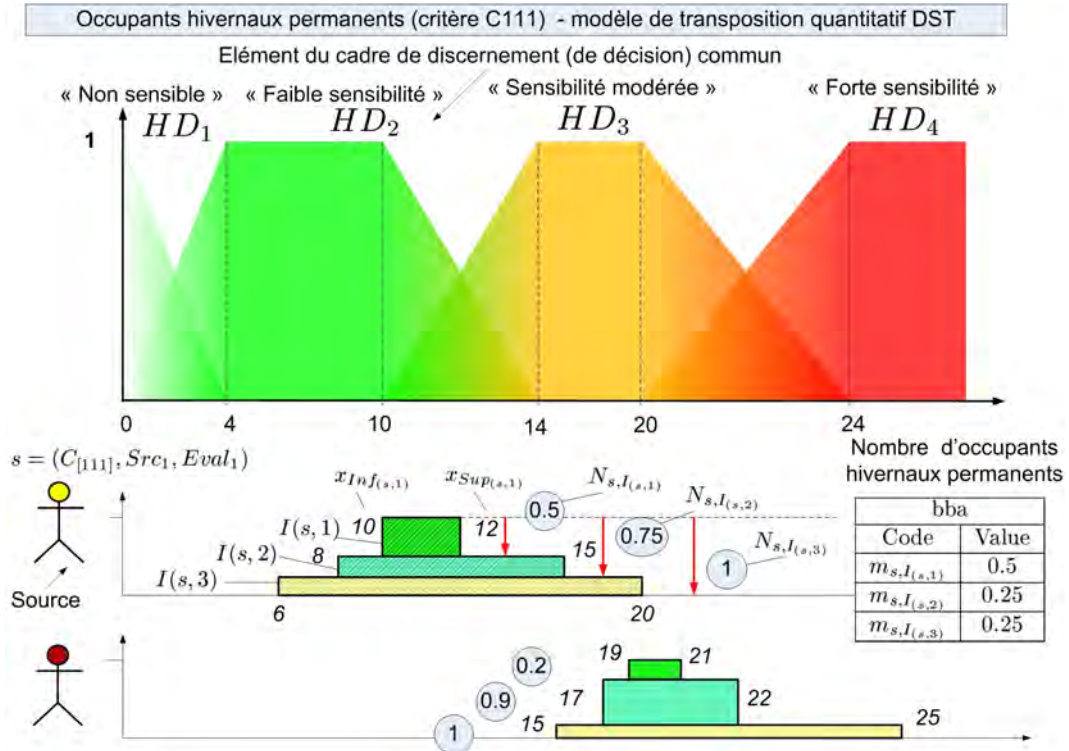


FIGURE 9.7 – Passage des mesures de possibilités aux masses des intervalles d'évaluation - critère $C_{[111]}$

Les masses calculées pour chacun des intervalles d'évaluation sont transposées vers le cadre

9.1. MODÈLE SIMPLIFIÉ D'ANALYSE DE LA SENSIBILITÉ D'UN SITE D'AVALANCHES

de discernement de décision et réparties sur la base d'un ratio surfacique entre les éléments du cadre de discernement. La figure (FIG. 9.8) illustre le cas de l'intervalle d'évaluation 2 proposé par la source 1.

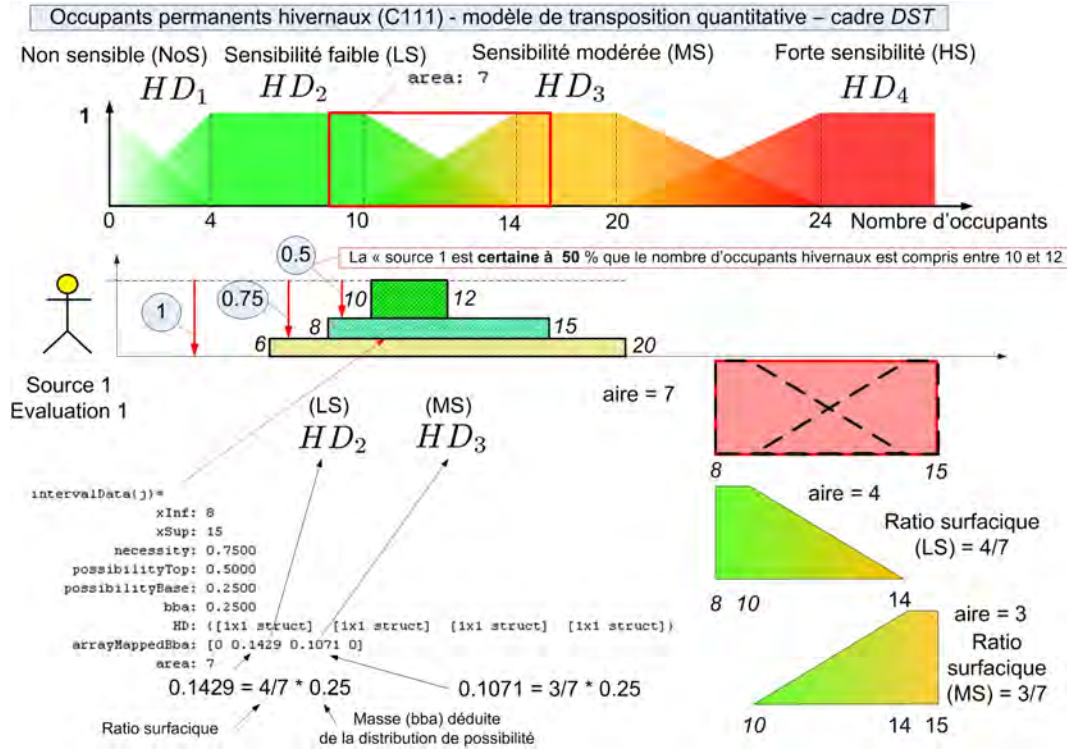


FIGURE 9.8 – Passage d'un intervalle d'évaluation à la masse transposée par calcul d'un ratio surfacique - Modèle de transposition *DST* - critère $C_{[111]}$

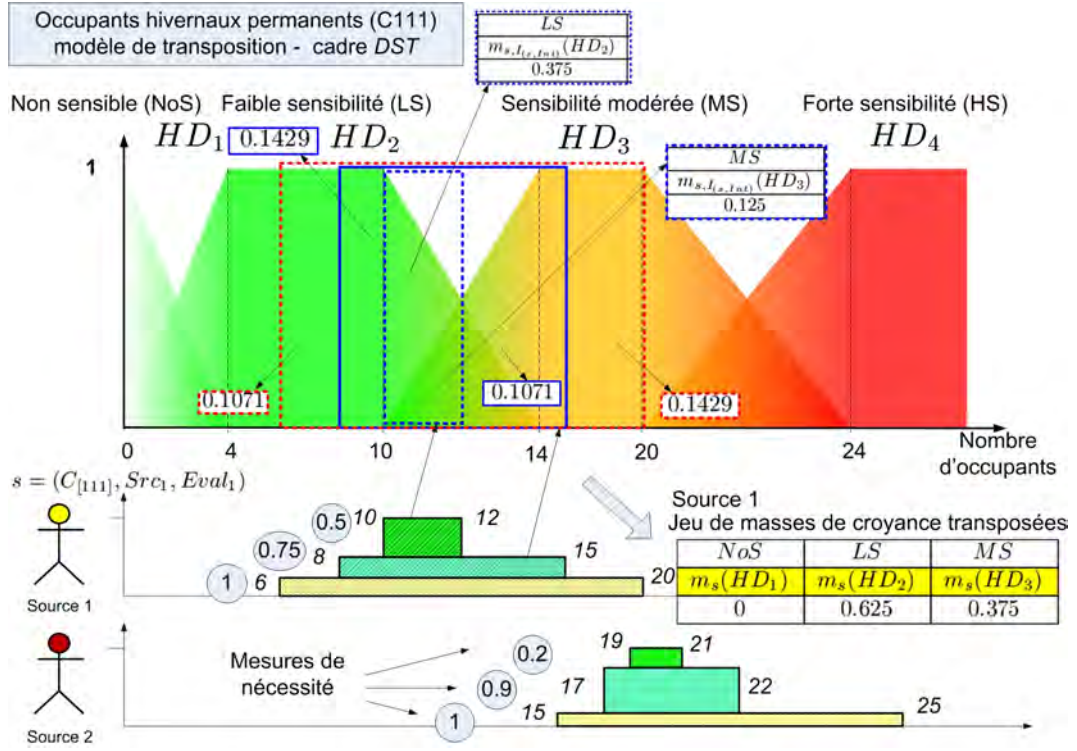
Au final, on obtient les masses transposées à partir de l'ensemble des intervalles d'évaluation sur les éléments du cadre de discernement de décision (HD_1, HD_2, \dots) (TAB. 9.2).

		source s codée par $(C_{[111]}, Src_1, Eval_1)$			
		Cadre de discernment - <i>DST</i> - $\Theta = \{NoS, LS, MS, HS\}$			
		<i>NoS</i>	<i>LS</i>	<i>MS</i>	<i>HS</i>
Int.	Code	$m_{s, I(s, Int)}(HD_1)$	$m_{s, I(s, Int)}(HD_2)$	$m_{s, I(s, Int)}(HD_3)$	$m_{s, I(s, Int)}(HD_4)$
1	$I(s, 1)$	0	0.375	0.125	0
2	$I(s, 2)$	0	0.1429	0.1071	0
3	$I(s, 3)$	0	0.1071	0.1429	0

TABLE 9.2 – Jeu de masses de croyance transposées (bba)- Critère $C_{[111]}$ - Source 1 - Evaluation 1 - Modèle de transposition *DST*

Pour chaque élément du cadre de discernement de décision HD_k (avec $k \in \{1, 2, \dots, 4\}$), on somme les masses résultant de la transposition de chaque intervalle pour obtenir le jeu de masse transposé correspondant à l'évaluation du critère $C_{[111]}$ par la source s_1 ⁷ (FIG. 9.9).

7. également notée Src_1 sur les figures


 FIGURE 9.9 – Jeu complet de masses transposées d’une évaluation - critère $C_{[111]}$ - Modèle de transposition *DST*

Le jeu de masses de croyance transposées est ensuite affaibli en fonction du facteur d’affaiblissement (fiabilité) de la source ayant procédé à l’évaluation. Dans notre exemple, la source s_1 (Src_1) est affectée d’un facteur $\alpha_{Rel, (C_{[111]}, Src_1, Eval_1)} = 0.5$ (TAB. 9.3).

Source s codée par $(C_{[111]}, Src_1, Eval_1)$					
Facteur d’affaiblissement de fiabilité $\alpha_{Rel, (C_{[111]}, Src_1, Eval_1)} = 0.5$					
Frame of discernment - <i>DST</i> - $\Theta = \{NoS, LS, MS, HS\}$					
	<i>NoS</i>	<i>LS</i>	<i>MS</i>	<i>HS</i>	Θ
Masses avant affaiblissement	$m_s(HD_1)$	$m_s(HD_2)$	$m_s(HD_3)$	$m_s(HD_4)$	$m'_s(\Theta)$
	0	0.625	0.375	0	0
Masses affaiblies	$m'_s(HD_1)$	$m'_s(HD_2)$	$m'_s(HD_3)$	$m'_s(HD_4)$	$m'_s(\Theta)$
	0	0.3125	0.1875	0	0.5

 TABLE 9.3 – Masses de croyance (bba) avant et après affaiblissement (fiabilité) - Critère $C_{[111]}$ - Source 1 - Evaluation 1 - Modèle de transposition *DST*

Transposition quantitative dans le cadre de *DStmT* (*DStmT* mapping)

Dans le cadre de la *DStmT* (modèle hybride), le cadre de discernement de décision $\Theta_{Decision} = \{HD_1, HD_2, HD_3\}$ se compose de 3 classes d’évaluation qualitative de la sensibilité au risque d’avalanche considérées définies de la manière suivante $HD_1 =$ ‘Pas de sensibilité’, $HD_2 =$ ‘Faible sensibilité’, $HD_3 =$ ‘Forte sensibilité’ (voir 8.2.2⁸ et FIG. 8.5).

8. p. 185

9.1. MODÈLE SIMPLIFIÉ D'ANALYSE DE LA SENSIBILITÉ D'UN SITE D'AVALANCHES

Les masses transposées sont calculées sur le même principe que ci-dessus à partir de l'ensemble des intervalles d'évaluation sur les éléments du cadre de discernement de décision (HD_1, HD_2, \dots) (voir TAB. 9.2).

		Source s codée par $(C_{[111]}, Src_1, Eval_1)$		
		Cadre de discernement - $DSmT$ - $\Theta = \{NoS, LS, HS\}$		
		NoS	LS	HS
Int.	Code	$m_{s, I(s, Int)}(HD_1)$	$m_{s, I(s, Int)}(HD_2)$	$m_{s, I(s, Int)}(HD_3)$
1	$I(s, 1)$	0	0.464	0.0357
2	$I(s, 2)$	0	0.218	0.0319
3	$I(s, 3)$	0	0.186	0.0638

TABLE 9.4 – Transposition des intervalles d'évaluation en jeu de masses de croyance (bba)- Critère $C_{[111]}$ - Source 1 - Evaluation 1 - Modèle de transposition $DSmT$

Sur la base du modèle de transposition quantitative et d'un cadre de discernement de décision basés cette fois-ci sur un modèle $DSm_{hybride}$, les masses calculées pour chacun des intervalles d'évaluation sont transposées et réparties sur la base d'un ratio surfacique entre les éléments du cadre de discernement. La figure (FIG. 9.10) illustre le cas de l'intervalle d'évaluation 2 proposé par la source 1.

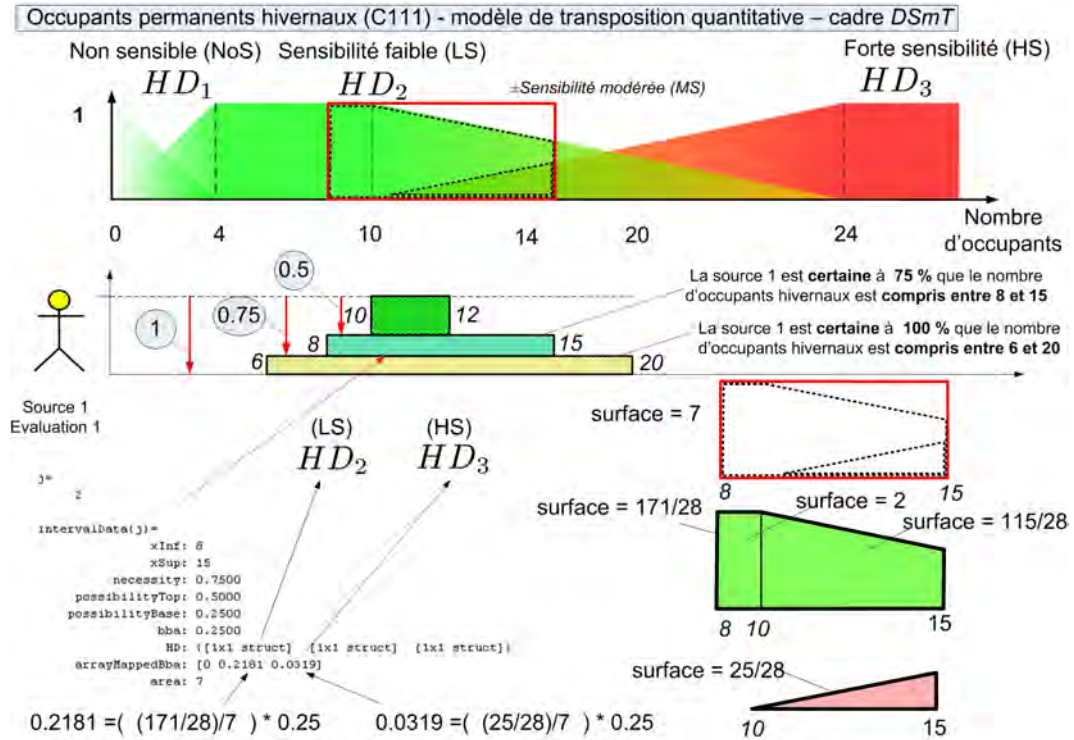


FIGURE 9.10 – Passage d'un intervalle d'évaluation à la masse transposée par calcul d'un ratio surfacique - critère $C_{[111]}$ - Modèle de transposition $DSmT$

Finalement, le jeu de masses de croyance transposées est ensuite affaibli en fonction du facteur d'affaiblissement (fiabilité) de la source ayant procédé à l'évaluation. Dans notre exemple, la source s_1 (Src_1) est affectée d'un facteur $\alpha_{Rel, (C_{[111]}, Src_1, Eval_1)} = 0.5$. On note ici la différence entre les masses de croyance issues du modèle de transposition basé sur un cadre lié à la DST

(TAB. 9.3) et à la *DSmT* (TAB. 9.5). Cette différence inévitable est due aux hypothèses du modèle notamment en termes de définition des intervalles flous. Dans le cadre du modèle de transposition *DSmT*, nous avons volontairement créé une zone d'intersection très large entre les classes HD_2 (faible sensibilité - LS) et HD_3 (forte sensibilité - HS) pour effectuer la comparaison avec le modèle DST en gardant les mêmes bornes. Dans un cas réel, cette hypothèse ne serait probablement pas la meilleure solution.

Source s codée par $(C_{[111]}, Src_1, Eval_1)$				
Facteur d'affaiblissement (fiabilité) $\alpha_{(C_{[111]}, Src_1, Eval_1)} = 0.5$				
Cadre de discernement - <i>DSmT</i> - $\Theta = \{NoS, LS, HS\}$				
	NoS	LS	HS	Θ
Masses (bba) avant affaiblissement	$m_s(HD_1)$	$m_s(HD_2)$	$m_s(HD_3)$	$m_s(\Theta)$
	0	0.869	0.131	0
Masses (bba) affaiblies	$m'_s(HD_1)$	$m'_s(HD_2)$	$m'_s(HD_3)$	$m'_s(\Theta)$
	0	0.4343	0.0657	0.5

TABLE 9.5 – Jeu de masses (bba) avant et après affaiblissement (fiabilité)- Critère $C_{[111]}$ - Source 1 - Evaluation n°1 - Modèle de transposition ("mapping") *DSmT*

Fusion des masses transposées provenant de plusieurs sources

Les masses de croyance transposées à partir des évaluations des différentes sources sont ensuite fusionnées en utilisant différentes règles de fusion (voir annexe I.2, p. 392). Dans un premier temps, la fusion est opérée dans le cadre de la *DST*. Une comparaison est proposée entre les trois règles de *Dempster* (*DST*) normalisée, de *Smets* et de la *PCR6* sur les masses de croyance avant affaiblissement dans le tableau TAB. 9.6 puis sur les masses affaiblies dans le tableau TAB. 9.7. Dans un second temps, les mêmes sources (uniquement dans le cas de sources avant affaiblissement) sont fusionnées dans le cadre de la *DSmT*.

Modèle de transposition *DST*

Cadre de discernement - <i>DST</i> - $Card(\Theta) = 4$							
α_{Rel}	\emptyset	HD_1	HD_2	HD_3	HD_4	Θ	
Facteur d'affaiblissement	ens. vide	Non sensible (NoS)	Faible sensibilité (LS)	Sensibilité modérée (MS)	Forte sensibilité (HS)	Θ	
$m_1 = m_{(C_{[111]}, Src_1, Eval_1)}$	1	0	0	0.625	0.375	0	0
$m_2 = m_{(C_{[111]}, Src_2, Eval_1)}$	1	0	0	0	0.8875	0.1125	0
<i>Processus de fusion n° 13 - Règle de Dempster normalisée</i>							
$m_{(C_{[111]})} = m_1 \oplus m_2$	0	0	0	1	0	0	0
<i>Processus de fusion n° 14 - Critère de Smets</i>							
$m_{(C_{[111]})} = m_1 \oplus m_2$	0.667	0	0	0.333	0	0	0
<i>Processus de fusion n° 5 - Règle PCR6</i>							
$m_{(C_{[111]})} = m_1 \oplus m_2$	0	0	0.290	0.690	0.020	0	0

TABLE 9.6 – Fusion des jeux de masses de croyances d'évaluation transposées - Critère $C_{[111]}$ - Sources d'évaluation non affaiblies - Modèle de transposition *DST* - Ordre de fusion (\oplus Critère(\oplus Source-Evaluation))

9.1. MODÈLE SIMPLIFIÉ D'ANALYSE DE LA SENSIBILITÉ D'UN SITE D'AVALANCHES

On retrouve facilement les résultats de la règle de fusion de *Dempster*. Le conflit est égal à $K = \sum_{A \cap B = \emptyset} m_1(A)m_2(B) = m_1(HD_2).m_2(HD_3) + m_1(HD_2).m_2(HD_4) + m_1(HD_3).m_2(HD_4) = 0.625 \cdot 0.8875 + 0.625 \cdot 0.1125 + 0.375 \cdot 0.1125 = 0.667$ d'où le facteur de normalisation $1 - K = 0.333$ On obtient :

- $m_1 \oplus m_2(HD_1) = 0$;
- $m_1 \oplus m_2(HD_2) = 0$;
- pour HD_3 , on a $\sum_{A \cap B = HD_3} m_1(A)m_2(B) = m_1(HD_3).m_2(HD_3) = 0.375 \cdot 0.8875 = 0.3328$
soit $m_{12}(HD_3) = m_1 \oplus m_2(HD_3) = \frac{\sum_{A \cap B = HD_3} m_1(A)m_2(B)}{1 - K} = 1$;
- HD_4 , on a $m_1 \oplus m_2(HD_4) = 0$.

Dans ce cas très simple, on voit qu'en utilisant la règle de *Dempster*, la masse fusionnée est entièrement attribuée à l'élément HD_3 . La règle de fusion de *Smets* attribue le conflit à l'ensemble vide \emptyset . La règle *PCR6* répartit quant à elle le conflit sur les éléments focaux (HD_2 , HD_3 et HD_4) proportionnellement à leur masse. Cette règle permet, contrairement aux autres approches, de réaliser la fusion des masses de croyance d'évaluation en conservant la cohérence des jeux de masses initiaux même dans les cas de fort conflit : elle doit donc être utilisée en priorité dans le cadre de la mise en œuvre de la méthodologie *ER - MCDA* dans le cadre de la *DST*.

Le tableau TAB. 9.7 reprend les mêmes jeux de masse de croyance en appliquant cette fois-ci un facteur d'affaiblissement aux 2 sources. On observe logiquement que la masse affectée à l'ignorance totale n'est plus nulle.

Cadre de discernement - <i>DST</i> - $Card(\Theta) = 4$							
α_{Rel}	\emptyset	HD_1	HD_2	HD_3	HD_4	Θ	
Facteur d'affaiblissement	ens. vide	Non sensible (<i>NoS</i>)	Faible sensibilité (<i>LS</i>)	Sensibilité modérée (<i>MS</i>)	Forte sensibilité (<i>HS</i>)	Θ	
$m_1 = m_{(C_{[111]}, Src_1, Eval_1)}$	0.5	0	0	0.3125	0.1875	0	0.5
$m_2 = m_{(C_{[111]}, Src_2, Eval_1)}$	0.7	0	0	0	0.621	0.079	0.3
<i>Processus de fusion n° 1 - Dempster-Shafer (règle normalisée)</i>							
$m_{(C_{[111]})} = m_1 \oplus m_2$	0	0	0.1223	0.6306	0.0514	0.1957	
<i>Processus de fusion n° 2 - Critère de Smets</i>							
$m_{(C_{[111]})} = m_1 \oplus m_2$	0.2335	0	0.0937	0.4834	0.0394	0.15	
<i>Processus de fusion n° 3 - PCR6</i>							
$m_{(C_{[111]})} = m_1 \oplus m_2$	0	0	0.1784	0.6229	0.0487	0.15	

TABLE 9.7 – Fusion des jeux de masses de croyances d'évaluation transposées - Critère $C_{[111]}$ - Sources d'évaluation affaiblies - Modèle de transposition *DST* - Ordre de fusion (\oplus Critère(\oplus Source-Evaluation))

Les jeux de masse résultant de la fusion des évaluations du critère $C_{[111]}$ sont ensuite utilisés dans le processus de fusion des critères considérés comme des sources. Ils peuvent ainsi être retrouvés dans les tableaux TAB. 9.10 et TAB. 9.11.

Modèle de transposition *DSmT*

Le tableau TAB. 9.8 correspond à la fusion des sources d'évaluation du critère $C_{[111]}$ transposées dans le cadre de la *DSmT*. Les étapes de calcul et la représentation dans le prototype sont illustrés sur la figure FIG. I.4 (p. 391).

Cadre de discernement - $DSmT$ - $Card(\Theta) = 3$								
	α_{Rel}	\emptyset	HD_1	$HD_1 \cap HD_2$	HD_2	$HD_2 \cap HD_3$	HD_3	Θ
	Facteur d'affaiblissement	ens. vide	Non sensible (NoS)	($NoS \cap LS$)	Faible sensibilité (LS)	($LS \cap HS$)	Forte sensibilité (HS)	Θ
$m_1 = m_{(C_{[111]}, Src_1, Eval_1)}$	1	0	0	0	0.896	0	0.131	0
$m_2 = m_{(C_{[111]}, Src_2, Eval_1)}$	1	0	0	0	0.311	0	0.689	0
<i>Processus de fusion n° 15 - Règle Dempster-Shafer interprétée en règle DSm</i>								
$m_{(C_{[111]})} = m_1 \oplus m_2$		0	0	0	0.270	0.639	0.091	0
<i>Processus de fusion n° 16 - Critère de Smets</i>								
$m_{(C_{[111]})} = m_1 \oplus m_2$		0	0	0	0.270	0.639	0.091	0
<i>Processus de fusion n° 17 - PCR6</i>								
$m_{(C_{[111]})} = m_1 \oplus m_2$		0	0	0	0.270	0.639	0.091	0

TABLE 9.8 – Fusion des jeux de masses de croyances d'évaluation transposées - Critère $C_{[111]}$ - Sources d'évaluation non affaiblies - Modèle de transposition $DSmT$ - Ordre de fusion (\oplus Critère(\oplus Source-Evaluation))

L'analyse des résultats montre que le cadre de la $DSmT$ permet, de manière native, de fournir des résultats de fusion cohérents et respectant la répartition initiale des masses de croyance. Le principe de la théorie $DSmT$ correspond par essence au contexte des modèles de transposition traduisant des variations continues entre des classes. A noter toutefois que le modèle considéré ici est un modèle hybride et que l'égalité des résultats obtenus est un cas particulier résultant de l'absence de conflit entre les jeux de masse. Une contrainte (intersection vide par hypothèse) existe en effet dans le modèle entre les classes NoS et HS .

Les résultats de l'évaluation des autres critères quantitatifs $C_{[121]}$ (Morphologie), $C_{[122]}$ (Histoire) et $C_{[123]}$ (Nivo-climatologie) ne sont pas détaillés et peuvent être trouvés en annexe I (p. 389).

9.1.3 Exemple de résultats détaillés pour un critère qualitatif : $C_{[112]}$

L'évaluation d'un critère qualitatif utilise tout d'abord un modèle d'évaluation qualitative pour obtenir un intervalle d'évaluation qualitatif, correspondant à des valeurs hautes et basses de crédibilité, et un modèle de transposition pour transformer cet intervalle en jeu de masses de croyance exprimées dans le cadre de discernement de décision. Le critère $C_{[112]}$ est un critère qualitatif correspondant à la *vulnérabilité* due aux infrastructures et équipements collectifs tels que des écoles, des salles communales . . . et situés dans la zone exposée. Ce critère est évalué selon trois classes principales correspondant, dans un ordre de sensibilité croissant à des équipements industriels, collectifs et enfin de secours.

Définition du cadre de discernement et des modèles d'évaluation qualitative dans le cadre de la DST ou de la $DSmT$

Deux modèles d'évaluation qualitative sont proposés et représentés sous la forme de diagramme de *Venn* (FIG. 9.11). Le choix dépend du concepteur du modèle et de la possibilité d'intersection entre les classes d'évaluation. Dans le cadre d'un modèle DST , on ne considère que trois classes d'évaluation exclusives (intersections vides) correspondant respectivement aux

9.1. MODÈLE SIMPLIFIÉ D'ANALYSE DE LA SENSIBILITÉ D'UN SITE D'AVALANCHES

infrastructures industrielles (*Ind*), collectives (*Col*) et de secours (*Resc*). Le cadre de la *DSmT* permet quant à lui de prendre en compte des équipements mixtes tels que des équipements à la fois industriels et de secours (central téléphonique, pont ...). Chacune des parties des diagrammes de Venn est identifiée selon la codification proposée par (Martin, 2009).

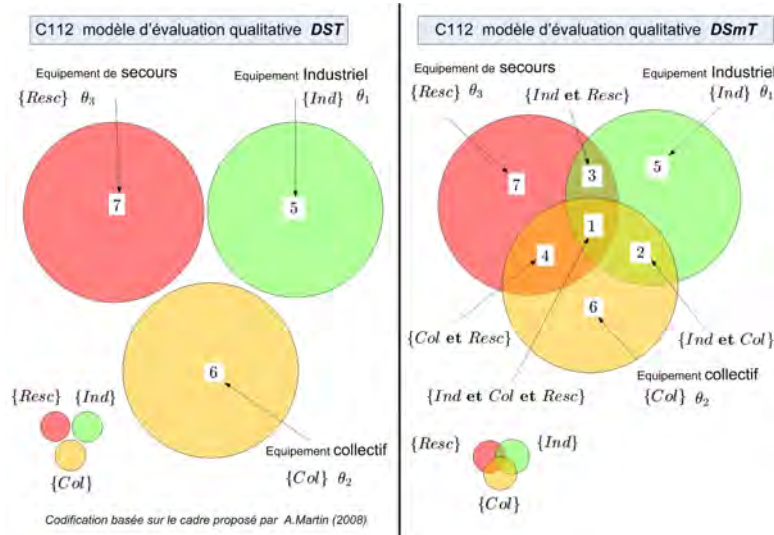
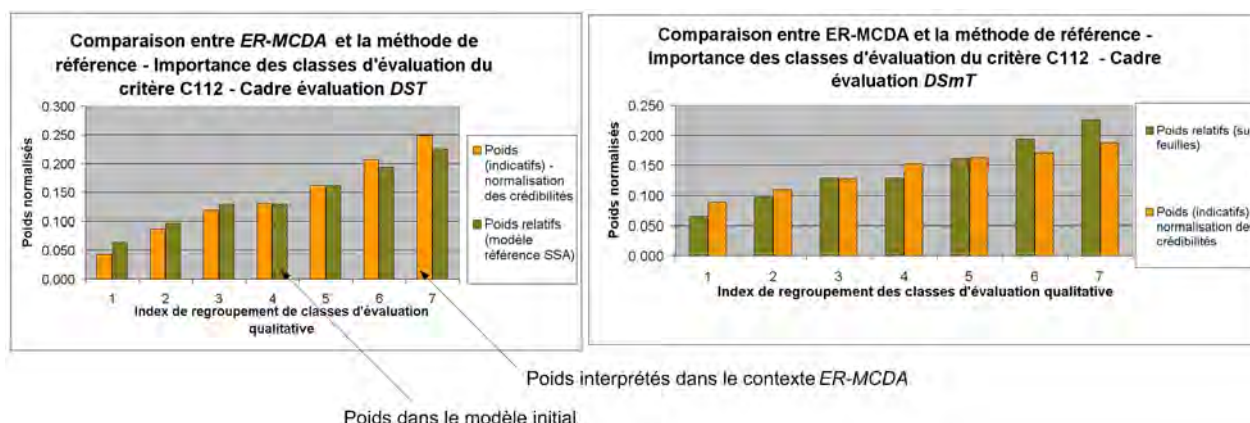


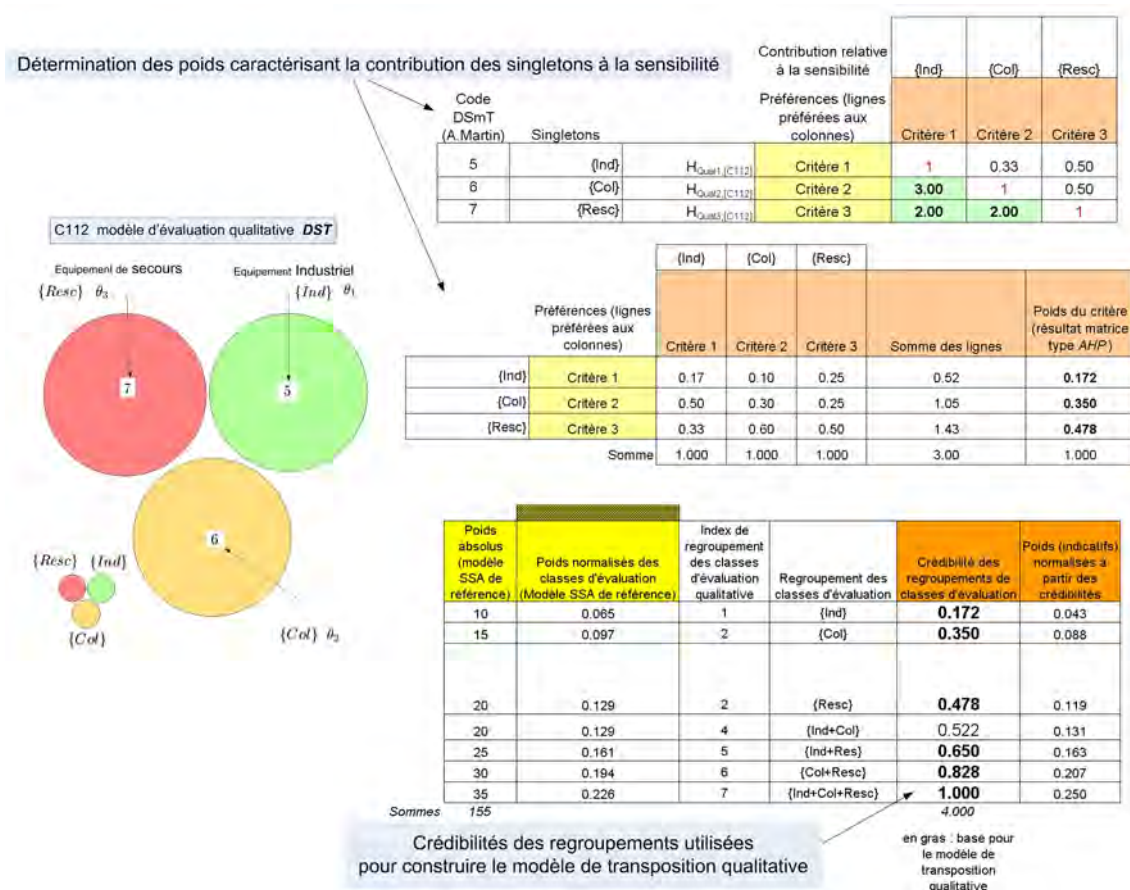
FIGURE 9.11 – Deux modèles d'évaluation qualitative du critère "Infrastructures" $C_{[112]}$

Evaluation qualitative dans le cadre de la *DST* (*DST* scaling)

Construction du modèle Chaque partie du diagramme de Venn (FIG. 9.11) constitue un singleton dans le modèle et contribue plus ou moins à la sensibilité globale du site. Cette contribution, associée à la notion d'*importance*, est analysée en utilisant le principe proposé par Saaty (1982) et une matrice de comparaison par paires entre les éléments. Par exemple, un équipement de type collectif apportera un supplément de sensibilité modéré par rapport à un équipement industriel (FIG. 9.13). A noter que les valeurs retenues restent, ici encore, purement fictives. Malgré cela, nous avons cependant cherché ici à correspondre le plus possible aux ordres de grandeur des poids issus du modèle réel *Sites Sensibles Avalanches*. La correspondance atteinte n'est pas parfaite (FIG. 9.12). Du fait des règles particulières utilisées pour remplir la matrice, l'indice de cohérence de la matrice de préférences est au-delà des valeurs limites (11.8% supérieur à la limite conseillée de 10%). On retrouve un problème certainement rencontré par (Beynon et al., 2000) mais non explicité clairement. Le choix de la meilleure méthode de détermination des masses de croyance dans le contexte qualitatif reste donc délicat et perfectible.

FIGURE 9.12 – Comparaison des pondérations (équivalentes) entre le modèle simplifié et le modèle *ER-MCDA*

Les poids calculés pour chaque partie selon la méthode *AHP* sont assimilés à des masses de croyance ($m(\cdot)$). Les classes étant des singletons, leurs masses correspondent aussi à des mesures de crédibilité (Bel) (TAB. 9.9 et FIG. 9.13).

FIGURE 9.13 – Détermination des masses de croyance et crédibilités des éléments - Critère qualitatif C_{112} - Modèle d'évaluation *DST*

On envisage ensuite les combinaisons de ces différents singletons pour représenter les cas pouvant être rencontrés lors de l'évaluation d'un site. Au final, on obtient une correspondance

9.1. MODÈLE SIMPLIFIÉ D'ANALYSE DE LA SENSIBILITÉ D'UN SITE D'AVALANCHES

entre des regroupements de parties (classes) et des mesures de crédibilité.

Définition	Codification des regroupements	Crédibilité (Bel)
$\{Ind\}$	[5]	0.172
$\{Col\}$	[6]	0.350
$\{Resc\}$	[7]	0.478
$\{Ind, Col\}$	[56]	0.522
$\{Ind, Resc\}$	[57]	0.650
$\{Col, Resc\}$	[67]	0.828
$\{Ind, Col, Resc\}$	[567]	1.000

TABLE 9.9 – Crédibilité des singletons et de leurs regroupements (unions) - Critère qualitatif $C_{[112]}$ - Modèle d'évaluation DST

Ces valeurs de crédibilité correspondant aux regroupements sont ensuite utilisées pour construire le modèle de transposition qualitative et définir les limites des intervalles flous $L - R$ composant le modèle en fonction de classes de sensibilité (FIG. 9.15).

Intervalle d'évaluation qualitative Lors de l'évaluation, un même équipement de type infrastructure peut appartenir à plusieurs classes d'évaluation (voir 8.4.2)⁹. Pour évaluer le critère qualitatif $C_{[112]}$, l'utilisateur choisit tout d'abord si les éléments du modèle d'évaluation correspondant soit à des équipements industriels (Ind), collectifs (Col) ou de secours ($Resc$) sont présents sur le site analysé. Il affecte en conséquence un booléen (0 ou 1) à la variable décrivant le choix de procéder à l'évaluation de la classe considérée ($input_g$). Des bornes hautes et basses de confiance dans la présence effective de ce type d'élément sur la zone sont ensuite saisies. Par exemple (FIG. 9.14), la source 1 considère qu'un équipement industriel est présent sur la zone avec une confiance minimale de 6 et une confiance maximale de 8 (sur une échelle de 1 à 9) soit une confiance moyenne normalisée égale à 0.875. Au final, sur la base des valeurs saisies par la source pour chaque élément, on peut déduire le facteur de confiance global de la source 1 interprété comme un facteur d'affaiblissement (0.842) et un intervalle de valeur de crédibilité [0.466, 0.628]. Cet intervalle unique, correspondant à une masse croyance unité, est transposé comme dans le cas d'un critère quantitatif (FIG. 9.15).

9. p. 203

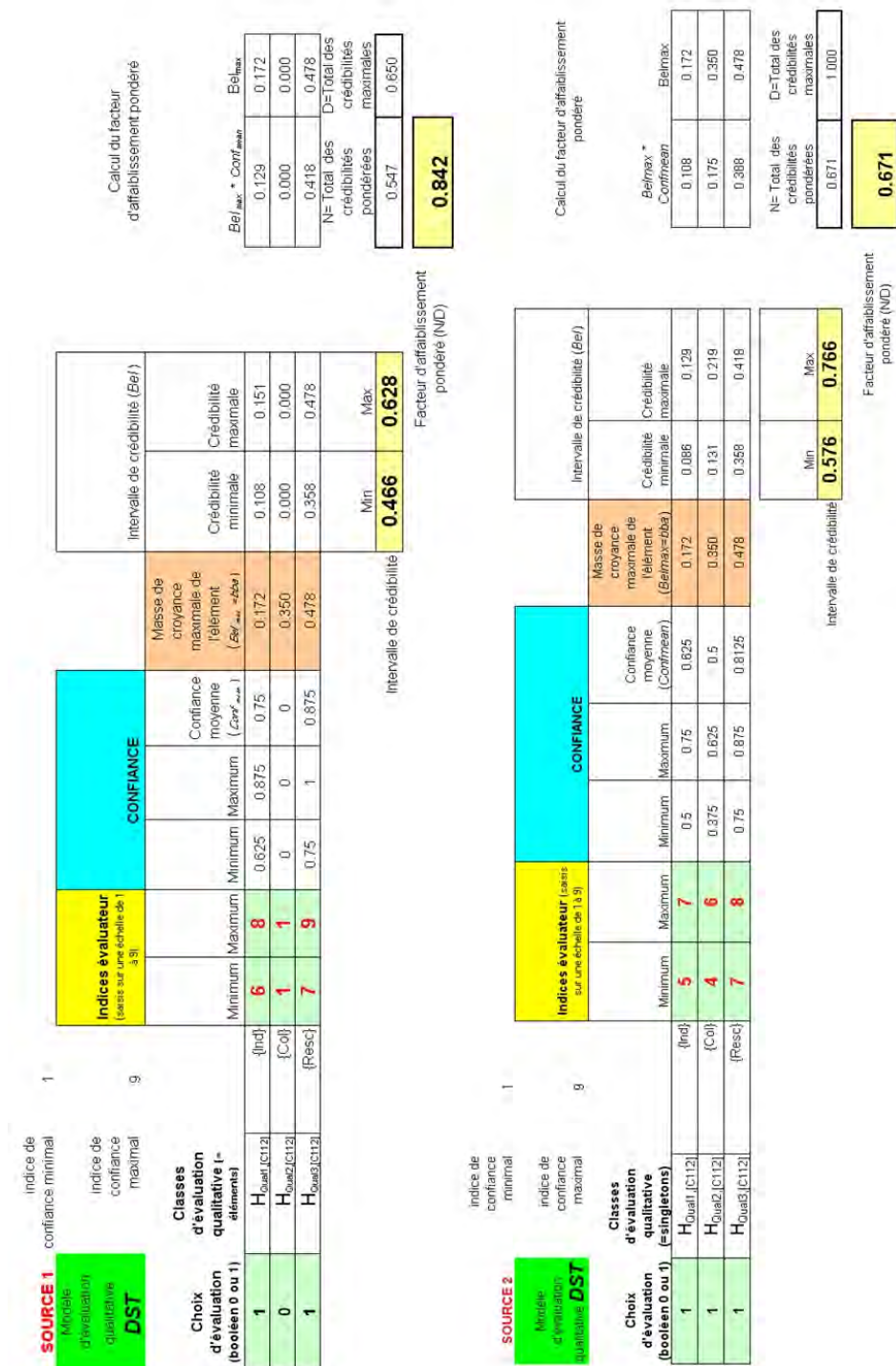


FIGURE 9.14 – Indices de confiance et intervalle d'évaluation qualitative du critère $C_{[112]}$ - Cadre *DST* - sources 1 et 2

Seuls les principes généraux associés à l'indice de confiance sont présentés ici. En pratique, cet indice va dépendre des conditions d'acquisition de l'information (l'information est-elle directe, l'évaluateur a constaté lui-même ou indirecte?), le mode d'acquisition (visite sur le terrain, analyse de photographies, étude sur carte) ... (Tacnet et al., 2006). Cet indice peut lui-même faire l'objet d'une analyse multicritères et le développement de telles méthodologies fait partie des perspectives de ce travail.

9.1. MODÈLE SIMPLIFIÉ D'ANALYSE DE LA SENSIBILITÉ D'UN SITE D'AVALANCHES

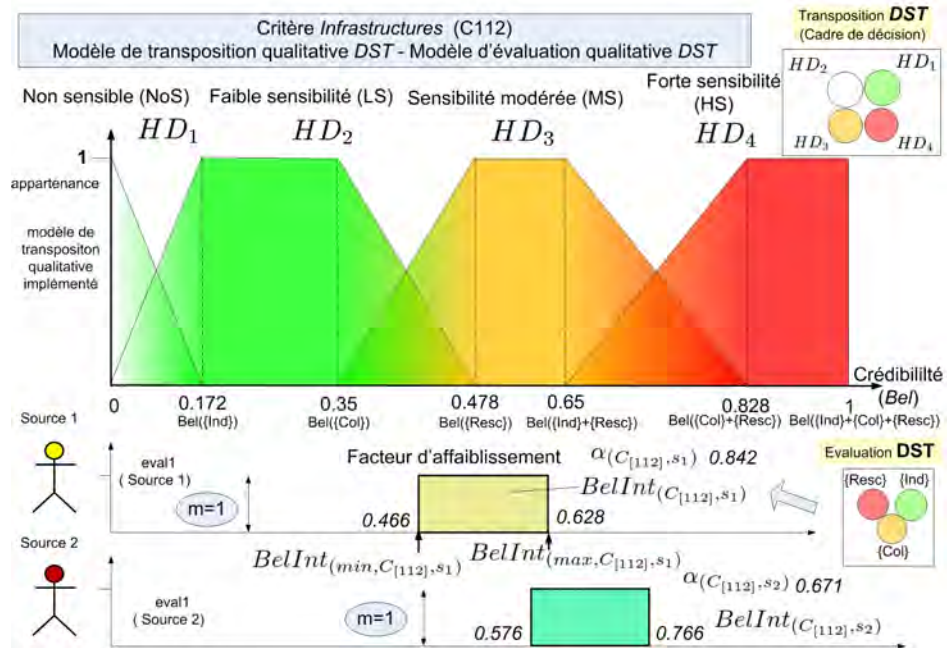
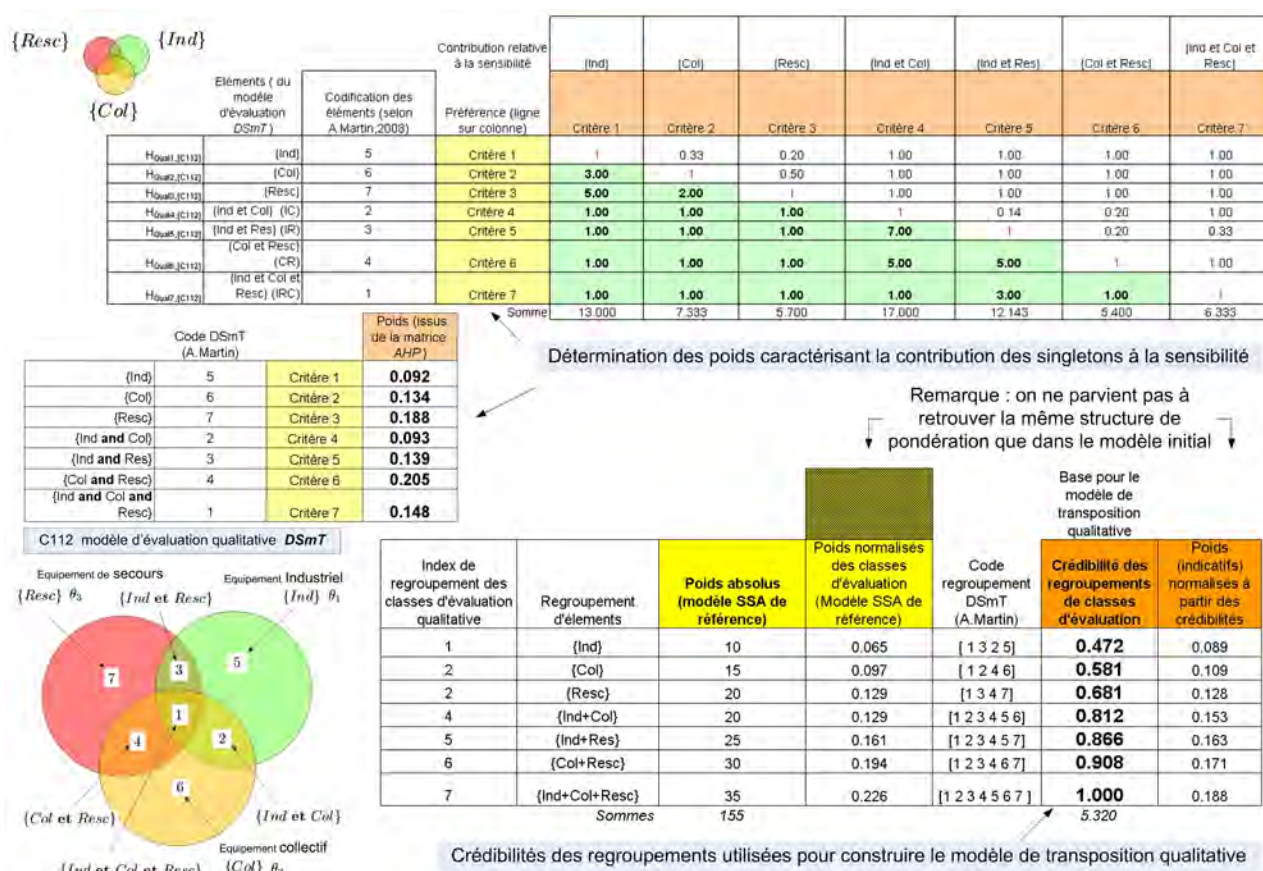


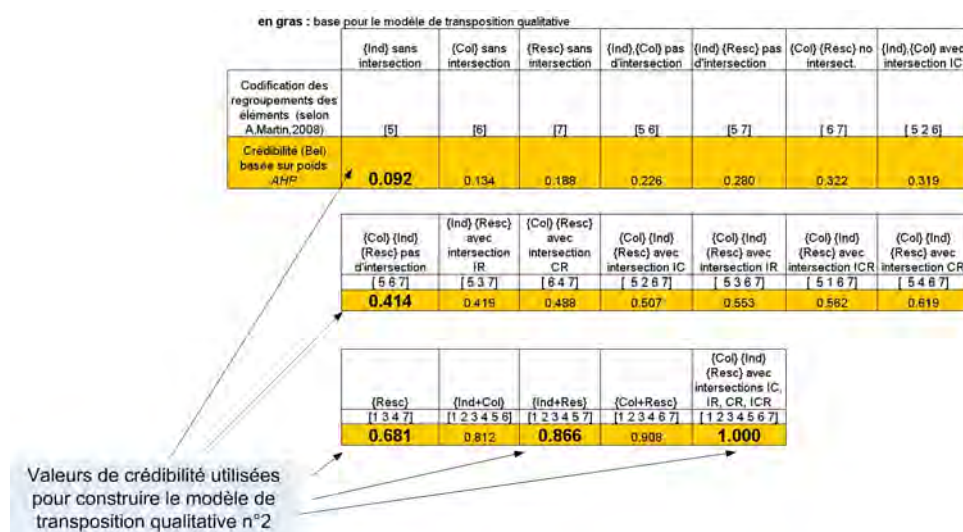
FIGURE 9.15 – Modèle de transposition (*DST*) qualitatif du critère $C_{[112]}$ et intervalles d'évaluation (*DST*) des sources 1 et 2

Modèle d'évaluation qualitative dans le cadre de la *DST* (*DST* scaling)

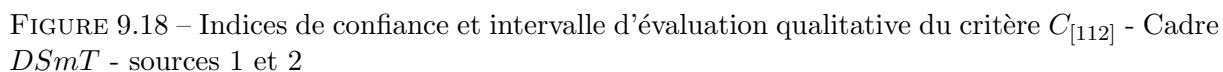
Construction du modèle. Les mêmes principes sont appliqués en considérant cette fois-ci un modèle basé sur le cadre de la *DST*. Ce modèle libre autorise les intersections entre les classes correspondant aux équipements industriels, collectifs et de secours (FIG. 9.11). Les éléments du modèle d'évaluation sont comparés en terme d'importance. Les poids sont dérivés en masses de croyance équivalentes à des crédibilités (FIG. 9.16).

FIGURE 9.16 – Détermination des masses de croyance et crédibilités des éléments - Critère qualitatif $C_{[112]}$ - Modèle d'évaluation *DSmT*

Les regroupements d'éléments permettent de calculer les crédibilités des combinaisons d'éléments pris en compte dans le modèle de transposition qualitative (FIG. 9.17).

FIGURE 9.17 – Crédibilités des regroupements d'éléments pour construire le modèle de transposition - Critère qualitatif $C_{[112]}$ - Modèle d'évaluation *DSmT*

Intervalle d'évaluation qualitative. L'évaluation est conduite selon le même principe que précédemment. La différence provient de la possibilité d'évaluer, de manière native, les équipements ayant une double fonction. La source 1 évalue par exemple, le cas d'un central téléphonique ayant à la fois le caractère d'équipement industriel et de secours (FIG. 9.18).



243

flous définissant le modèle proviennent des crédibilités des regroupements d'éléments du modèle d'évaluation (FIG. 9.17).

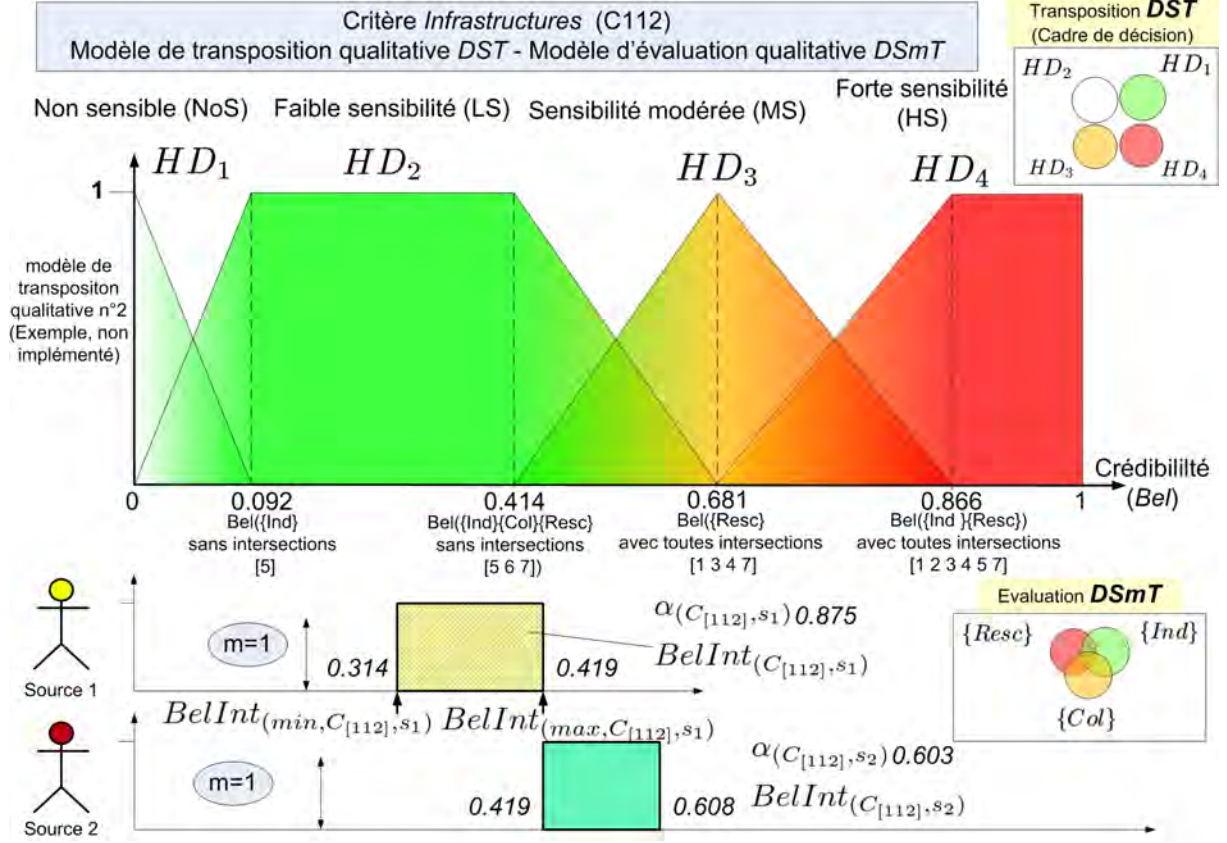


FIGURE 9.19 – Modèle de transposition (*DST*) qualitatif du critère $C_{[112]}$ et intervalles d'évaluation (*DSmT*) des sources 1 et 2

9.1.4 Critère de décision $C_{[1]}$: résultats de fusion

Facteurs d'affaiblissement

Deux types de facteurs d'affaiblissement sont associés aux deux phases successives de la méthodologie *ER-MCDA* (voir FIG. 8.30, p. 211) :

- les facteurs d'affaiblissement de fiabilité sont appliqués lors de la fusion des évaluations transposées fournies par les différentes sources. Ces facteurs proviennent d'une estimation directe et subjective pour les critères quantitatifs. Pour les critères qualitatifs, ils résultent indirectement de la phase d'évaluation qualitative (voir 9.1.3) ;
- les facteurs d'affaiblissement d'importance proviennent du modèle hiérarchique en considérant un modèle de normalisation *SommeMax* (voir 9.1.1 et FIG. 9.1). Les poids agrégés normalisés sont de nouveau normalisés sur la base du maximum d'entre eux pour obtenir les facteurs d'affaiblissement d'importance (FIG. 9.6) selon la méthode décrite en 8.5.2 (p. 211) ;

9.1. MODÈLE SIMPLIFIÉ D'ANALYSE DE LA SENSIBILITÉ D'UN SITE D'AVANCHES

Comparaison des processus de fusion n°1, 3, 7 et 9

Sur la base des évaluations proposées par les sources et précédemment décrites, les processus de fusion peuvent être très nombreux¹⁰. Ils correspondent aux combinaisons entre le choix de la théorie de modélisation du cadre de discernement, du mode de fusion, des règles et de l'ordre de fusion Nous ne décrivons ici que les résultats de comparaison entre deux règles de fusion (la règle de Dempster normalisée et la règle *PCR6*) et deux modélisations du cadre de discernement de décision dans le contexte de la *DST* (processus n°1 et 3) ou de la *DSmT* (processus n°7 et 9) (FIG. 9.20). Les autres processus de fusion envisagés peuvent être trouvés en annexe I (p. 389).

Mêmes hypothèses sauf cadre de discernement de décision
(*DST* vs. *DSmT*)

Processus de fusion	Nombre	1	3
	Nom	Processus de fusion 1	Processus de fusion 3
Raisonnement crédibiliste (ER)	Cadre de discernement de décision	Non Sensible (NoS) - LowS (LS) - MediumS (MS) - HighS (HS)	Non Sensible (NoS) - LowS (LS) - MediumS (MS) - HighS (HS)
	cardTheta	4	4
	Théorie (Fonctions de croyance)	DST	DST
Affaiblissement des critères et des évaluations	Mode d'affaiblissement des évaluations	Evaluations affaiblies	Evaluations affaiblies
	Mode d'affaiblissement des critères terminaux	Critère terminal affaibli - modèle SommeMax	Critère terminal affaibli - modèle SommeMax
Modèles de transposition et d'évaluation	type du modèle de transposition ("mapping")	DST	DST
	Modèle d'évaluation (pour les critères qualitatifs) ("Scaling")	DST	DST
Paramètres de la fusion	Règle de fusion	DST (Dempster normalisée)	PCR6
	Mode de fusion	Statique	Statique
	Ordre de fusion	(+Crit(+Src-Eval))	(+Crit(+Src-Eval))
	Cadre de calcul	A. Martin © 2008	A. Martin © 2008
Décision	Règle de décision	Maximum probabilité pignistique	Maximum probabilité pignistique
	Elément de décision	Singletons	Singletons
	Mode d'affichage	Combinaison et Décision	Combinaison et Décision

DST

Mêmes hypothèses sauf cadre de discernement de décision (*DST* vs. *DSmT*)

Processus de fusion	Nombre	7	9
	Nom	Processus de fusion 7	Processus de fusion 9
Raisonnement crédibiliste (ER)	Cadre de discernement de décision	Non sensible (NoS) - LowS (LS) - HighS (HS)	Non sensible (NoS) - LowS (LS) - HighS (HS)
	cardTheta	3	3
	Théorie (Fonctions de croyance)	DsmT	DsmT
Affaiblissement des critères et des évaluations	Mode d'affaiblissement des évaluations	Evaluations affaiblies	Evaluations affaiblies
	Mode d'affaiblissement des critères terminaux	Critère terminal affaibli - modèle SommeMax	Critère terminal affaibli - modèle SommeMax
Modèles de transposition et d'évaluation	type du modèle de transposition ("mapping")	DSmT	DSmT
	Modèle d'évaluation (pour les critères qualitatifs) ("Scaling")	DST	DST
Paramètres de la fusion	Règle de fusion	DST (Dempster normalisée)	PCR6
	Mode de fusion	Statique	Statique
	Ordre de fusion	(+Crit(+Src-Eval))	(+Crit(+Src-Eval))
	Cadre de calcul	A. Martin © 2008	A. Martin © 2008
Décision	Règle de décision	Maximum probabilité pignistique	Maximum probabilité pignistique
	Elément de décision	Singletons et éléments focaux	Singletons et éléments focaux
	Mode d'affichage	Combinaison et Décision	Combinaison et Décision

DSmT

FIGURE 9.20 – Description des processus de fusion n°1, 3, 7 et 9

Niveau de décision - Modèle de transposition *DST*

Dans le cadre d'un modèle de discernement de décision basé sur la *DST*, les tableaux présentent les résultats de la fusion des critères terminaux après affaiblissement pour le processus de fusion n° 1 (TAB. 9.10) et le processus de fusion n° 3 (TAB. 9.11). Pour chaque critère terminal, considéré comme une source, les jeux de masses de croyance correspondent au résultat de la fusion des évaluations affaiblies fournies par les différentes sources d'information. Par exemple, pour le critère $C_{[111]}$ et les processus de fusion n°1 et 3, les jeux de masses de croyance proviennent de la fusion des sources 1 et 2 suivant le tableau TAB. 9.7. Les facteurs d'affaiblissement d'importance sont déduits du modèle hiérarchique dépendant du mode de normalisation (ici le modèle *SommeMax*) et de saisie des données (saisie de poids absolus au niveau des feuilles) (FIG. 9.6 et FIG. 9.1).

Dans les tableaux ci-dessous, les jeux de masses de croyance des critères ($m_{(\oplus C_{[111]})}$ par exemple) correspondent aux valeurs avant l'application du facteur d'affaiblissement. Le résultat

10. voir la description et la numérotation des processus en annexe I.2, p. 392

fusionné $m_{(\oplus C_{[1]})}$ est par contre bien obtenu après avoir affaibli les jeux de masses des critères .

Cadre de discernement - DST - $Card(\Theta) = 4$							
α	\emptyset	HD_1	HD_2	HD_3	HD_4	Θ	
Facteur d'affaiblissement (<i>importance</i>)	ens. vide	Non sensible (<i>NoS</i>)	Faible sensibilité (<i>LS</i>)	Sensibilité modérée (<i>MS</i>)	Forte sensibilité (<i>HS</i>)	Θ	
$m_1 = m_{(\oplus C_{[111]})}$	1	0	0	0.1223	0.6306	0.0514	0.1957
$m_2 = m_{(\oplus C_{[112]})}$	0.875	0	0	0.0011	0.9164	0.0238	0.0587
$m_3 = m_{(\oplus C_{[121]})}$	0.75	0	0	0.0293	0.9536	0.005	0.012
$m_4 = m_{(\oplus C_{[122]})}$	0.25	0	0	0.1633	0.8194	0	0.0172
$m_5 = m_{(\oplus C_{[123]})}$	0.25	0	0	0.0125	0.9224	0.0453	0.0198
<i>Processus de fusion n° 1 - Dempster-Shafer (règle normalisée)</i>							
$m_{(\oplus C_{[1]})} = m_1 \oplus m_2 \oplus m_3 \oplus m_4 \oplus m_5$	0	0	0.0059	0.9842	0.0031	0.0068	

TABLE 9.10 – Jeu de masses de croyances (bba)- Critère de décision $C_{[1]}$ - Processus de fusion n° 1 - Critères terminaux affaiblis- Sources d'évaluation affaiblies - Ordre de fusion (\oplus Critère(\oplus Source-Evaluation)) - modèle de transposition DST - modèle d'évaluation qualitative DST

Cadre de discernement - DST - $Card(\Theta) = 4$							
α	\emptyset	HD_1	HD_2	HD_3	HD_4	Θ	
Facteur d'affaiblissement (<i>importance</i>)	ens. vide	Non sensible (<i>NoS</i>)	Faible sensibilité (<i>LS</i>)	Sensibilité modérée (<i>MS</i>)	Forte sensibilité (<i>HS</i>)	Θ	
$m_1 = m_{(\oplus C_{[111]})}$	1	0	0	0.1784	0.6229	0.0487	0.15
$m_2 = m_{(\oplus C_{[112]})}$	0.875	0	0	0.001	0.9102	0.0368	0.052
$m_3 = m_{(\oplus C_{[121]})}$	0.75	0	0	0.0393	0.9363	0.0143	0.01
$m_4 = m_{(\oplus C_{[122]})}$	0.25	0	0	0.1902	0.7973	0	0.0125
$m_5 = m_{(\oplus C_{[123]})}$	0.25	0	0	0.0098	0.8386	0.1392	0.0125
<i>Processus de fusion n° 3 - PCR6 Rule</i>							
$m_{(\oplus C_{[1]})} = m_1 \oplus m_2 \oplus m_3 \oplus m_4 \oplus m_5$	0	0	0.0196	0.8279	0.0047	0.1478	

TABLE 9.11 – Jeu de masses de croyances (bba)- Critère de décision $C_{[1]}$ - Processus de fusion n° 3 - Critères terminaux affaiblis - Sources d'évaluation affaiblies -Ordre de fusion (\oplus Critère(\oplus Source-Evaluation)) - modèle de transposition DST - modèle d'évaluation qualitative DST

L'interprétation des résultats doit tenir compte d'un affaiblissement important des sources (critères 2 à 5) et de jeux de masses de croyance peu conflictuels. La comparaison des résultats obtenus par application de la règle de *Dempster* (TAB. 9.10) et par application la règle *PCR6*

9.1. MODÈLE SIMPLIFIÉ D'ANALYSE DE LA SENSIBILITÉ D'UN SITE D'AVALANCHES

(TAB. 9.11) permet de voir que les jeux de masses fusionnés de chaque critères sont différents. Au final, la règle *PCR6* conserve la logique de la répartition des masses de croyances entre les classes de décision en proposant une valeur d'ignorance totale plus réaliste par rapport aux données initiales.

Niveau de décision - Modèle de transposition *DSmT*

Les tableaux TAB. 9.12 (processus de fusion n°7) et TAB. 9.13 (processus de fusion n°9) présentent, dans le cadre de la *DSmT*, des résultats équivalents aux processus de fusion n°1 et n°3 envisagés dans le cadre de la *DST*. Il convient de noter que dans notre modèle *DSmT*, les résultats sont les mêmes pour la règle de *Dempster* (à interpréter comme la règle *DSm* dans ce contexte) et pour la règle *PCR6* puisque le conflit n'existe pas.

Cadre de discernement - <i>DSmT</i> - $Card(\Theta) = 3$								
α	\emptyset	HD_1	$HD_1 \cap HD_2$	HD_2	$HD_2 \cap HD_3$	HD_3	Θ	
Facteur d'affaiblissement (<i>importance</i>)	ens. vide	Non sensible (<i>NoS</i>)	$NoS \cap LS$	Faible sensibilité (<i>LS</i>)	$LS \cap HS$	Forte sensibilité (<i>HS</i>)	Θ	
$m_1 = m_{(\oplus C_{[111]})}$	1	0	0	0	0.3337	0.2238	0.2925	0.15
$m_2 = m_{(\oplus C_{[112]})}$	0.875	0	0	0	0.3068	0.2995	0.3417	0.052
$m_3 = m_{(\oplus C_{[121]})}$	0.75	0	0	0	0.3706	0.3841	0.2354	0.01
$m_4 = m_{(\oplus C_{[122]})}$	0.25	0	0	0	0.8638	0.0989	0.0248	0.0125
$m_5 = m_{(\oplus C_{[123]})}$	0.25	0	0	0	0.2752	0.3986	0.3138	0.0125
<i>Processus de fusion n° 7 - Dempster-Shafer (normalized rule)</i>								
$m_{(\oplus C_{[1]})} = m_1 \oplus m_2 \oplus m_3 \oplus m_4 \oplus m_5$	0	0	0	0	0.0868	0.8563	0.0532	0.0037

TABLE 9.12 – Jeu de masses de croyances (bba)- Critère de décision $C_{[1]}$ - Processus de fusion n° 7 - Critères terminaux affaiblis - Sources d'évaluation affaiblies - Cadre *DSmT* - Ordre de fusion (\oplus Critère(\oplus Source-Evaluation)) - modèle de transposition *DSmT* - modèle d'évaluation qualitative *DST*

Cadre de discernement - $DSmT$ - $Card(\Theta) = 3$								
α	\emptyset	HD_1	$HD_1 \cap HD_2$	HD_2	$HD_2 \cap HD_3$	HD_3	Θ	
Facteur d'affaiblissement (<i>importance</i>)	ens. vide	Non sensible (<i>NoS</i>)	$NoS \cap LS$	Faible sensibilité (<i>LS</i>)	$LS \cap HS$	Forte sensibilité (<i>HS</i>)	Θ	
$m_1 = m_{(\oplus C_{[111]})}$	1	0	0	0	0.3337	0.2238	0.2925	0.15
$m_2 = m_{(\oplus C_{[112]})}$	0.875	0	0	0	0.3068	0.2995	0.3417	0.052
$m_3 = m_{(\oplus C_{[121]})}$	0.75	0	0	0	0.3706	0.3841	0.2354	0.01
$m_4 = m_{(\oplus C_{[122]})}$	0.25	0	0	0	0.8638	0.0989	0.0248	0.0125
$m_5 = m_{(\oplus C_{[123]})}$	0.25	0	0	0	0.2752	0.3986	0.3138	0.0125
Processus de fusion n° 9 - PCR6 rule								
$m_{(\oplus C_{[1]})} = m_1 \oplus m_2 \oplus m_3 \oplus m_4 \oplus m_5$	0	0	0	0	0.0868	0.8563	0.0532	0.0037

TABLE 9.13 – Jeu de masses de croyances (bba)- Critère de décision $C_{[1]}$ - Processus de fusion n° 9 - Critères terminaux affaiblis - Sources d'évaluation affaiblies - Cadre $DSmT$ - Ordre de fusion (\oplus Critère(\oplus Source-Evaluation)) - $DSmT$ modèle de transposition - DST modèle d'évaluation qualitative

Ces résultats peuvent être représentés et synthétisés graphiquement. On peut notamment observer au niveau des abscisses la nature différente des éléments du cadre de discernement dans les processus de fusion basés sur des modèles de transposition dans le cadre de la DST et de la $DSmT$. La notation ' $2n3$ ' correspond à l'intersection des classes d'évaluation HD_2 et HD_3 du cadre de discernement commun de décision dans le cadre d'un modèle basé sur la $DSmT$. La notation ' $1u2u3$ ' correspond à $\Theta = \{HD_1, HD_2, HD_3\}$ (FIG. 9.21). Dans ce cas d'application, la décision se porte sur la classe d'évaluation HD_3 soit un niveau de sensibilité modérée dans le cadre d'un modèle DST et sur l'intersection entre les classes faible (HD_2) et forte (HD_3) dans le cadre d'un modèle $DSmT$. On peut également visualiser la contribution respective de chacun des critères à la décision avant la fusion produisant la décision. Les jeux de masses représentés correspondent aux jeux de masses affaiblies et on observe que des masses importantes ont été affectées à Θ (' $1u2u3u4$ ' ou ' $1u2u3$ ') du fait de l'utilisation d'un facteur d'affaiblissement classique pour représenter l'importance des critères, avec toutes les limites évoquées dans la partie décrivant la méthodologie. Il faut ici toutefois rappeler que ces exemples ne sont qu'indicatifs. Ils dépendent entièrement des choix effectués au niveau des modèles de transposition tant au niveau de leur principe que des bornes retenues. En l'état actuel, les limites entre les intervalles flous $L-R$ constituant ces modèles résultent d'une interprétation arbitraire, parmi de nombreuses autres possibles, de bornes issues du modèle de décision de référence. C'est assurément à ce niveau que des études de sensibilité et que de nouveaux approfondissements sont requis.

9.1. MODÈLE SIMPLIFIÉ D'ANALYSE DE LA SENSIBILITÉ D'UN SITE D'AVALANCHES

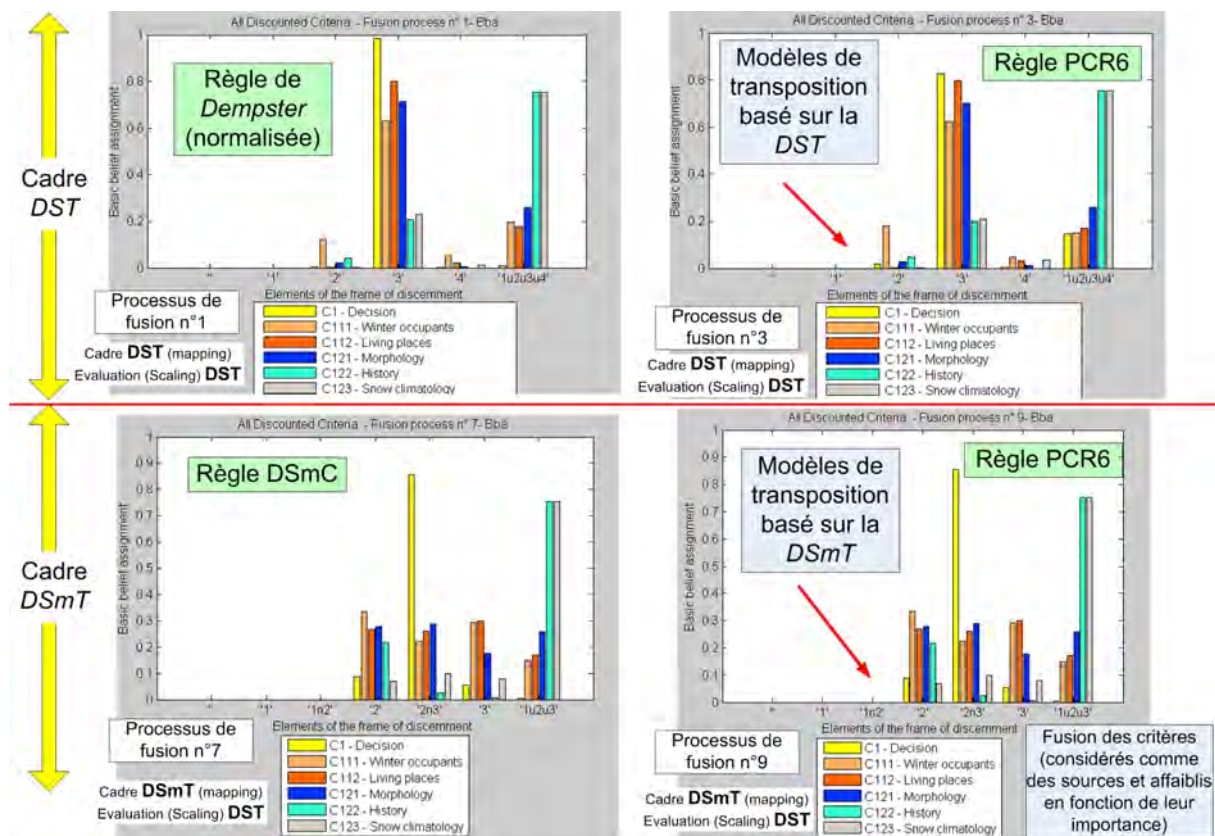


FIGURE 9.21 – Synthèse graphique des résultats (bba) des processus de fusion n°1,3,7 et 9

La question de l'interprétation des résultats

La fusion d'information réalisée au stade des critères correspond à la phase finale de l'approche *ER – MCDA*. L'analyse des résultats de la fusion en terme de décision vise à choisir, pour une alternative donnée, entre les différentes classe d'évaluation du cadre de discernement de décision. Le critère de choix peut porter sur la valeur maximale de masses de croyance, de crédibilité (approche pessimiste), de plausibilité (approche optimiste) ou de probabilité pignistique (approche moyenne). Les quelques applications associant l'analyse multicritères et le raisonnement crédibiliste existantes utilisent ces fonctions. Beynon et al. (2000) interprète les résultats par rapport à l'étendue de l'intervalle entre la crédibilité et la plausibilité, plus l'intervalle est petit plus l'information est certaine. Interpréter un processus de fusion en terme de décision demeure un problème connu et difficile (Martin and Quidu, 2008) (Bloch and al., 2001).

Une méthode peut toujours être trouvée mais elle doit être compréhensible par un décideur dans ses principes et son fonctionnement. Sur ce point, il reste encore à développer des méthodes permettant d'interpréter les résultats de la fusion en fournissant des résultats compréhensibles par les décideurs. Une première étape consiste à effectuer des analyses de sensibilité poussée sur des cas simples mais aussi d'imaginer une autre forme d'interprétation des résultats de la fusion dans un cadre ... multicritères. Dès lors, les méthodes d'agrégation totale ou partielle peuvent être envisagées. Les méthodes de sur-classement sont une piste non abordée dans ce travail mais sont aussi critiquées pour leur difficulté d'interprétation.

9.1.5 Approche orientée objet pour le développement d'un prototype

Une conception orientée objet

La mise en œuvre de la méthodologie *ER – MCDA* nécessite une double formulation du problème. Il s'agit à la fois de représenter la structure hiérarchique, d'en déduire les pondérations puis d'appliquer le processus de fusion et d'en exploiter les résultats. La structuration et la reconfiguration hiérarchique font appel à différentes méthodes de normalisation. Les processus de fusion sont, quant à eux, décrits par l'ordre de fusion des sources, les cadres de discernement utilisés, les modèles de transposition quantitatifs et qualitatifs, les règles de fusion, de décision L'association de l'approche multicritères et de la fusion exige donc la conception d'un environnement structuré capable de représenter et traiter les données manipulées. Une approche orientée objet a été mise en œuvre pour concevoir l'application de calcul. Dans le standard *UML*, le processus de fusion peut, par exemple, être représenté partiellement de la façon suivante (FIG. 9.22).

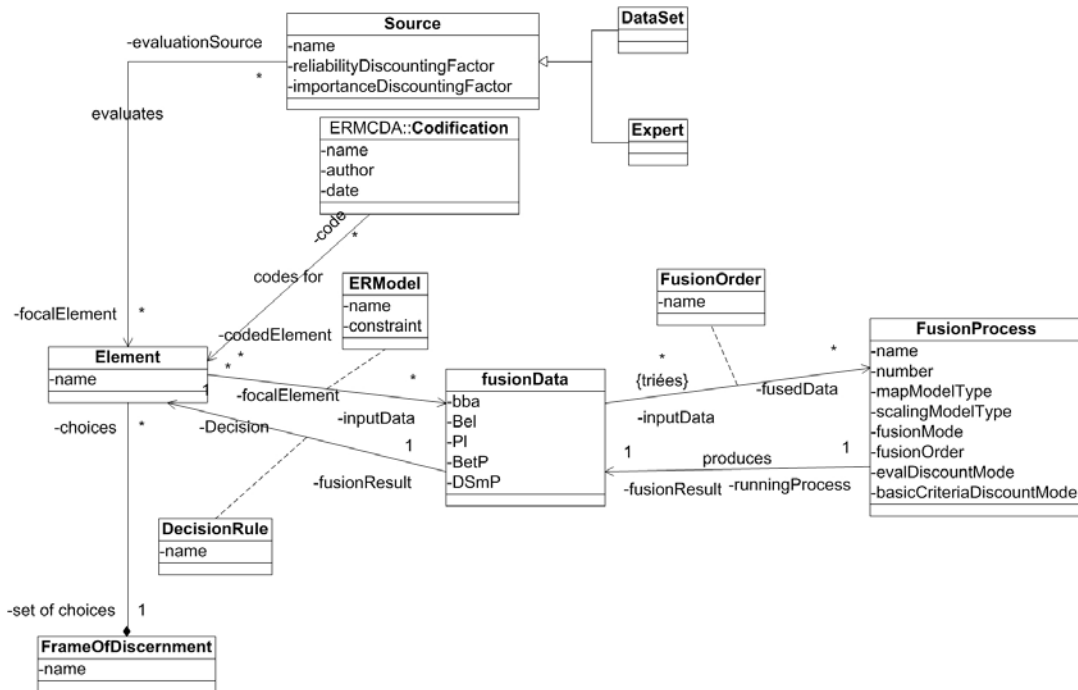


FIGURE 9.22 – Méthodologie *ER – MCDA* - Description du processus de fusion par un diagramme de classes *UML*

L'importance des résultats graphiques

L'interprétation des résultats concerne à la fois dans le cadre des approches multicritères et les applications de fusion d'information. Dans une optique d'aide à la décision, la visualisation des résultats apparaît essentielle pour compléter des outils de calcul et permettre une communication avec les décideurs. Au-delà des principes mêmes de la méthodologie, cet aspect constitue un point clé pour envisager une utilisation opérationnelle des méthodes. Des exemples de résultats et la description du prototype sont donnés en annexe I.3 (p. 395).

9.1.6 Synthèse

Un exemple simplifié Le cas d'application de la méthodologie décrit les principales étapes de la méthodologie dénommée *ER-MCDA* associant le raisonnement crédibiliste et l'analyse multi-

9.1. MODÈLE SIMPLIFIÉ D'ANALYSE DE LA SENSIBILITÉ D'UN SITE D'AVALANCHES

critères hiérarchique. En reprenant l'exemple de l'étude d'un site exposé à un risque d'avalanche, il s'agit de définir si le niveau de sensibilité est faible, moyen, fort mais aussi, de manière plus originale, de mettre en évidence le degré de "vérité" associé à ce classement. Un site peut être classé comme très sensible alors que les informations utilisées pour évaluer les critères sont très incertaines, imprécises ou résultent de sources peu fiables. La qualité des évaluations, le niveau de conflit entre les sources peuvent varier d'un critère à un autre. Le modèle hiérarchique utilisé est une version simplifiée à 5 critères d'un modèle réel visant à déterminer le niveau de sensibilité d'un site avalancheux.

La méthode est mise en œuvre numériquement de l'évaluation des critères quantitatifs et qualitatifs par les différentes sources à la fusion permettant d'obtenir une décision. Deux sources de fiabilité variables évaluent de manière imprécise et incertaines chacun des critères quantitatifs et qualitatifs du modèle dans les contextes des théories de *Dempster-Shafer* (*DST*) et de *Dezert-Smarandache* (*DSmT*). Trois exemples de calcul permettent d'illustrer la démarche pour deux critères quantitatifs et qualitatifs ainsi que pour le critère général de décision. Deux configurations associées aux cadres de modélisation de la *DSmT* et de la *DST* sont comparées systématiquement. Trois règles de fusion, la règle de *Dempster* (normalisée), la règle de *Smets* et la règle *PCR6* sont présentées au travers de résultats partiels principalement pour illustrer la capacité de gestion du conflit de ces règles de fusion.

Les atouts de la théorie de *Dezert-Smarandache* (*DSmT*) Les quelques exemples de fusion mis en œuvre au premier stade de la démarche au niveau des évaluations puis au cours de la seconde étape de fusion des critères mettent en évidence facilement les avantages de la théorie *DSmT*. Le choix de modèles hybrides permet de représenter de manière plus réaliste le problème de fusion. Les règles *DSm* et de redistribution partielle du conflit évitent les difficultés associées à l'utilisation de la règle de Dempster et d'un modèle de *Shafer* d'hypothèses exclusives. Les résultats de la fusion sont donc plus fiables. L'introduction de cette nouvelle théorie dans le cadre d'application associant fusion et aide multicritères à la décision est donc particulièrement pertinente.

La gestion imparfaite de l'importance Un verrou essentiel a été identifié dans la partie méthodologique au sujet de la différence entre l'importance et la fiabilité (associée à l'incertitude) des sources dans la perspective d'associer une démarche de fusion et une approche multicritères. En assimilant un critère à une source comme proposé dans la littérature, l'utilisation de facteurs d'affaiblissement ne permet pas de distinguer une source importante et peu fiable, d'une source peu importante mais fiable. Une perspective a été proposée sans justification théorique et nous avons donc utilisé l'approche critiquée dans les calculs de l'application. Cet aspect devra être approfondi dans les travaux ultérieurs.

L'importance et la difficulté de la formulation du problème Le cadre de la méthode *ER – MCDA* propose une structuration originale d'un problème de décision en exploitant des principes empruntés aux domaines de l'analyse multicritères hiérarchique et de la fusion d'information. Chacune de ces approches repose respectivement sur une formulation du problème qui est connue pour être une étape difficile des processus de mise en œuvre. En pratique, la démarche nécessite de :

- Formuler le problème de décision sous une forme hiérarchique pour déterminer les pondérations ;
- Expliciter un cadre de discernement de décision commun ;
- Définir un ou plusieurs modèles de transposition pour chaque critère quantitatif et qualitatif ;
- Définir les cadres de discernement et les modèles d'évaluation qualitatifs.

La confrontation de la méthode avec un cas d'application concret soulève immédiatement un grand nombre de questions notamment sur le choix des classes de décision. Un modèle de *Shafer* (cadre de la *DST*) et un modèle hybride (cadre de la *DSmT*) ont été retenus pour représenter le cadre de décision associé aux niveaux de sensibilité. Le modèle hybride basé sur deux classes est probablement trop simplifié par rapport à la réalité et l'interprétation des résultats n'est pas vraiment significatif, les masses de croyance étant généralement affectées à des valeurs "moyennes".

La nécessité d'études de sensibilité et d'un processus de validation En se référant à l'étude bibliographique relative à l'utilisation conjointe de la théorie des fonctions de croyance et des méthodes d'aide multicritères à la décision, on peut distinguer deux types d'approches. Les premières correspondent à des cas d'application très simples portant sur un nombre limité d'alternatives ou de critères, les secondes abordent des problèmes plus complexes avec des résultats qui sont alors difficiles à tracer et à comprendre dans l'optique d'une décision.

Notre exemple prototype n'est pas beaucoup plus compliqué mais permet de couvrir l'ensemble des phases de la méthodologie et de se confronter aux difficultés d'implémentation et de mise en œuvre. Cette application ne constitue évidemment pas une étude exhaustive, ni une analyse de sensibilité de la méthode aux nombreuses et différentes hypothèses de calcul. Il s'agit essentiellement d'illustrer la faisabilité et de mettre en place les premiers outils permettant l'application conjointe de l'analyse multicritères hiérarchique et de la fusion d'information.

Dans l'immédiat, les futurs travaux devront porter sur l'étude comparative des meilleures stratégies de fusion et sur l'amélioration de l'interprétation pour la décision. Les essais devront porter également sur le test de différentes configurations d'évaluations plus ou moins imprécises, incertaines et conflictuelles. Dans un second temps, le prototype informatique devra être amélioré et/ou transféré sous une forme permettant son utilisation à des fins opérationnelles.

Cette nécessité débouche sur un paradoxe : valider un modèle d'aide à la décision nécessite d'aborder un problème réel sur lequel le décideur peut exprimer un avis de référence. Il faut donc trouver un cas réaliste mais suffisamment simple pour être analysé complètement dans le cadre d'une étude méthodologique.

9.2 Vers une application spatiale de la méthode *ER-MCDA* : zonage du risque dans un contexte d'informations imparfaites

Ce cas d'application propose le principe et les bases de l'extension spatiale de l'approche combinant l'analyse multicritères (Laaribi, 2000) et la théorie des fonctions de croyance. L'incertitude dans le cadre d'applications géographiques concerne classiquement les référentiels géographiques (Burrough and McDonnel, 2004) et les modèles numériques de terrain (Dorren and Heuvelink, 2004)(Rousseaux, 2004). Nous nous intéressons ici à l'imperfection de l'information attributaire des systèmes d'information géographique.

9.2.1 Dimension spatiale du problème de décision associé au zonage des risques

L'approche précédente, correspondant à la caractérisation de la sensibilité d'un site au risque d'avalanche, est étendue à une problématique spatiale. Le zonage des risques consiste à définir des zones de risques homogènes assorties de restrictions plus ou moins importantes en terme d'autorisations de constructions (FIG. 9.23). L'identification et la qualification et la description des scénarios d'avalanche sont les premières étapes indispensables de la quantification de l'aléa,

9.2. VERS UNE APPLICATION SPATIALE DE LA MÉTHODE *ER-MCDA* : ZONAGE DU RISQUE DANS UN CONTEXTE D'INFORMATIONS IMPARFAITES

représentant un phénomène dont on caractérise la fréquence et l'intensité. Cette information constitue la base de l'ensemble du processus de gestion du risque : ces données sont utilisées pour définir les mesures structurelles associées aux ouvrages de protection et les mesures non-structurelles correspondant à la gestion de l'occupation du sol, de l'alerte, des évacuations. Dans le cas du zonage des risques et des plans de prévention des risques (P.P.R.), les raisonnements et méthodes impliqués dans l'analyse de l'aléa et du même coup dans les décisions de gestion ne sont pas toujours très explicitées et tracées (Tacnet et al., 2005a). Le dispositif français d'information préventive sur les avalanches est l'un des plus aboutis au niveau mondial au travers de ses deux dispositifs¹¹ que sont la *CLPA* (Carte de localisation des phénomènes d'avalanches) et l'*EPA* (Enquête permanente sur les avalanches). L'*EPA* est une chronique d'événements historiques. La *CLPA* est constituée de relevés d'extension maximale d'avalanche comprenant une cartographie et des fiches d'information textuelles. L'hétérogénéité des observateurs, le manque de formation avant un important programme de rénovation entamé en 2002, font que les données ne peuvent pas toutes être considérées comme totalement fiables.

Dans le meilleur des cas, des limites connues de manière indiscutable pour les événements contemporains ayant fait l'objet de retours d'expérience (Tacnet et al., 2006) peuvent être exploitées. Dans le contexte de la *CLPA*, les limites d'avalanche sont estimées et retranscrites à partir de témoignages recueillis par des chargés d'étude auprès des habitants et des professionnels de la montagne. Les procédures de collecte et transcription dans le système d'information sont décrites en détail mais l'analyse de l'information de base reste soumise à l'appréciation et à la qualification des chargés d'étude.

Au final, le zonage des risques tel qu'il est réalisé dans le cadre des *P.P.R.* est largement conditionné par la qualité intrinsèque des données collectées. La traçabilité du processus et l'évaluation de la qualité des données produites par les phases techniques du processus de gestion du risque nous apparaissent comme essentielles pour permettre aux décideurs de considérer le niveau de confiance associé à l'information dans leur choix.

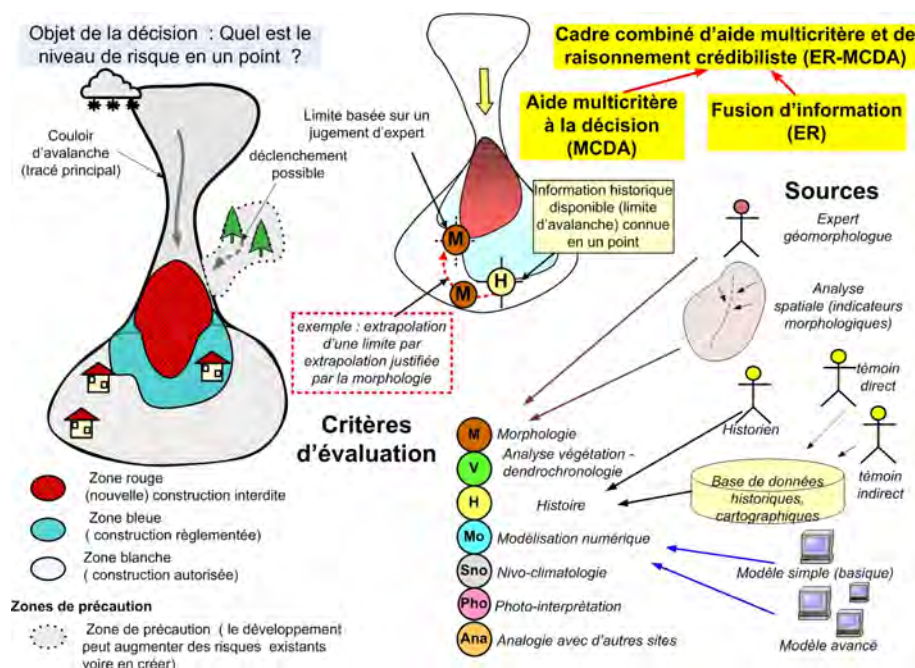


FIGURE 9.23 – Cadre de fusion d'information dans le contexte de zonage des risques

Le zonage des risques est un problème de fusion dans la mesure où il vise à analyser et

11. L'ensemble du dispositif disponible sur <http://www.avalanches.fr>

combiner des informations imparfaites et/ou incertaines provenant de sources multiples plus ou moins fiables (experts, bases de données) pour évaluer les classes d'appartenance associées aux composantes du risque (atteinte, exposition, intensité, fréquence). Une méthode assurant la synthèse des avis sera requise dans les cas où l'information provient à la fois d'observations, de mesures et de jugements d'expert par exemple dans le cas d'analyse géomorphologique de formes sur le terrain. Dans ces situations, le cadre de raisonnement proposé, associant la fusion et l'approche multicritères est utile. Le problème peut donc être posé de la manière suivante : un expert doit, par exemple, déterminer si un point particulier est atteint ou pas par une avalanche ou une crue torrentielle. Les données du problème de fusion liées au contexte du zonage sont les suivants :

- un ensemble P de n points noté $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ au niveau desquels on souhaite évaluer les composantes du risque ;
- un ensemble C de m critères utilisés pour l'évaluation noté $C = \{c_1, c_2, \dots, c_m\}$;
- un ensemble IS de t sources d'informations non humaines noté $IS = \{info_1, info_2, \dots, info_t\}$;
- un ensemble ES de s sources d'information humaines (experts) noté $ES = \{exp_1, exp_2, \dots, exp_s\}$.

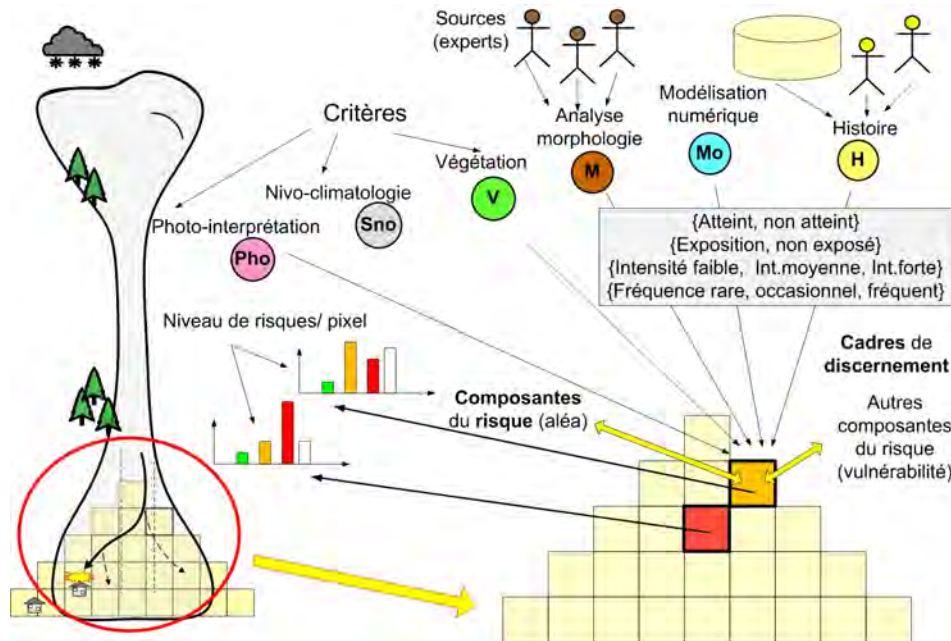


FIGURE 9.24 – Principe de la fusion des composantes du risque avec une composante spatiale

9.2.2 Pixel vs. zones : deux stratégies de modélisation

La problématique de fusion associée au problème de zonage des risques correspond notamment au choix du cadre de discernement et du mode de raisonnement. Doit-on raisonner sur une zone géographique ou sur des pixels ?

Le raisonnement crédibiliste basé sur la théorie de *Dempster-Shafer* a déjà été utilisé dans le cadre d'applications spatialisées pour caractériser la charge en polluants (Wadsworth and Hall, 2007), la dégradation des sols (Thiam, 2005), le taux de couverture végétale (Corgne, 2004) en un point donné d'une zone géographique. L'analyse d'image sonar pour déterminer la nature géologique des fonds marins (Martin and Quidu, 2008) se rattache à un problème de classification d'image mais comporte également une dimension spatiale. Olteanu (2008) utilise la DST pour apparier des bases de données géographiques en analysant et comparant pour un pixel donné la localisation des objets, la toponymie et la proximité sémantique des pixels situés autour de lui.

Par rapport à l'approche précédente visant à évaluer la sensibilité globale d'un site, l'aspect

9.2. VERS UNE APPLICATION SPATIALE DE LA MÉTHODE *ER-MCDA* : ZONAGE DU RISQUE DANS UN CONTEXTE D'INFORMATIONS IMPARFAITES

géographique induit une difficulté supplémentaire. La définition des zones associées aux niveaux d'aléa et de risque résulte d'un raisonnement spatial : "*cette avalanche (ou crue torrentielle) a déjà atteint (ou est plus ou moins capable d'atteindre) ce point ou cette zone*". L'expert raisonne en exploitant des objets géographiques surfaciques (les zones) ou linéaires (les tracés). La superposition de ces informations spatialisées permet ensuite de connaître la nature des informations disponibles en chaque point. Pour appliquer la théorie des fonctions de croyances à notre contexte, le raisonnement est conduit à l'échelle du pixel. En chaque point, on fusionne les informations provenant des différents critères (morphologie, histoire, modélisation numérique ...) sur la base d'un cadre de discernement constitué de niveaux de risque fort, modéré, faible soit $\Theta_{Risque} = \{RisqueFort, RisqueMoyen, RisqueFaible\}$. La saisie des informations se fait de manière vectorielle (zones, objet linéaires, points) et le processus de fusion se fait de manière pixellisée. Dans son principe, cette méthode consiste à pratiquer localement une version simplifiée de l'analyse de sensibilité qui a été développée ci-dessus à l'échelle d'un site complet (FIG. 9.24). Les cadres théoriques liés à la *DST* ou à la *DSmT* peuvent être utilisés de manière indifférente dans une approche similaire à celle développée dans (Corgne et al., 2006). Les résultats doivent ensuite être analysés et filtrés pour produire une décision et aboutir au zonage effectif. Le raisonnement à l'échelle de zones géographiques a également été imaginé sur la base d'un cadre de discernement constituée de zones géographiques associées directement à un niveau de risque et décrite par la source (critère) ayant conduit à les placer à ce niveau de risque. Cette hypothèse revient à considérer par exemple un cadre de discernement défini par $\Theta_{ZoneRisqueFort} = \{ZoneRisqueFort_{morphologie}, ZoneRisqueFort_{histoire}, ZoneRisqueFort_{modele}, \dots\}$. Ces zones peuvent avoir une intersection non nulle. L'expert cherche à définir une zone synthétique à fort niveau de risque sur la base de toutes les informations disponibles. Dans ce cas, le cadre de discernement doit être créé dynamiquement d'après les intersections réelles des zones spatiales correspondant au niveau de risque étudié. Sur ces bases, le cadre théorique de la *DSmT* est le seul qui puisse exploiter l'intersection entre les zones. Cette approche est possible pour un même niveau de risque (toutes les zones de risque fort) mais semble moins appropriée dans les cas où on souhaite également prendre en compte des risques de niveau moyen et faible. Dans ce cas, deux cadres de discernement sont en effet nécessaires, l'un relatif aux niveaux de risques et l'autre relatif à des zones spatiales.

9.2.3 Conclusion sur l'application spatiale

Ce cas d'application correspond à la proposition d'un principe de fusion d'information spatialisée qui n'a pas été mis en œuvre concrètement dans le cadre de ce travail. Il correspond à la problématique de l'établissement de cartes de zonage d'aléa puis de risques. Il renvoie aux questions évoquées dans le cadre de l'analyse de la traçabilité des informations dans le cadre des plans de prévention des risques (P.P.R.). La démarche de fusion de données mise en œuvre a pour but de combiner et prendre en compte l'information imparfaite exprimée par des sources plus ou moins fiables dans le cadre de l'analyse d'un type de phénomène déterminé (avalanches, crues torrentielles ...). Cette approche nous semble pouvoir être élargie dans le sens d'une spatialisation élargie des risques associant et combinant des risques de plusieurs natures en même point. Ceci rejoint, dans une certaine manière, les approches relatives à la spatialisation du risque (November, 2006, 2008) qui associent les territoires, les risques et des valeurs abstraites associées à la construction de ces risques. La "vérité" de l'information, résultant d'un processus d'expertise, peut être ici une nouvelle couche abstraite à intégrer dans ces modèles et approches.

Quatrième partie

Discussion - Conclusion

Chapitre 10

Discussion

Toute démarche d'expertise dans le domaine des risques naturels est assimilable à un processus de décision. L'analyse du contexte et des pratiques d'expertise confirme les liens étroits entre l'information plus ou moins imparfaite et incertaine et la décision. La traçabilité des processus d'expertise est aussi indispensable que perfectible.

Les méthodes d'aide multicritères à la décision sont considérées comme des supports méthodologiques pertinents pour analyser le risque. L'imperfection de l'information (incertitude, imprécision, conflit) s'exprime au stade de l'évaluation des critères pouvant être décrits par de nombreuses sources de fiabilité variable. Dans ce contexte, les théories des possibilités et des fonctions de croyance sont utilisées pour modéliser et combiner l'information disponible en vue d'une décision au stade de l'évaluation et de la décision. La théorie des ensembles flous est utilisée pour établir un lien entre les évaluations et le cadre de décision (FIG. 10.1).

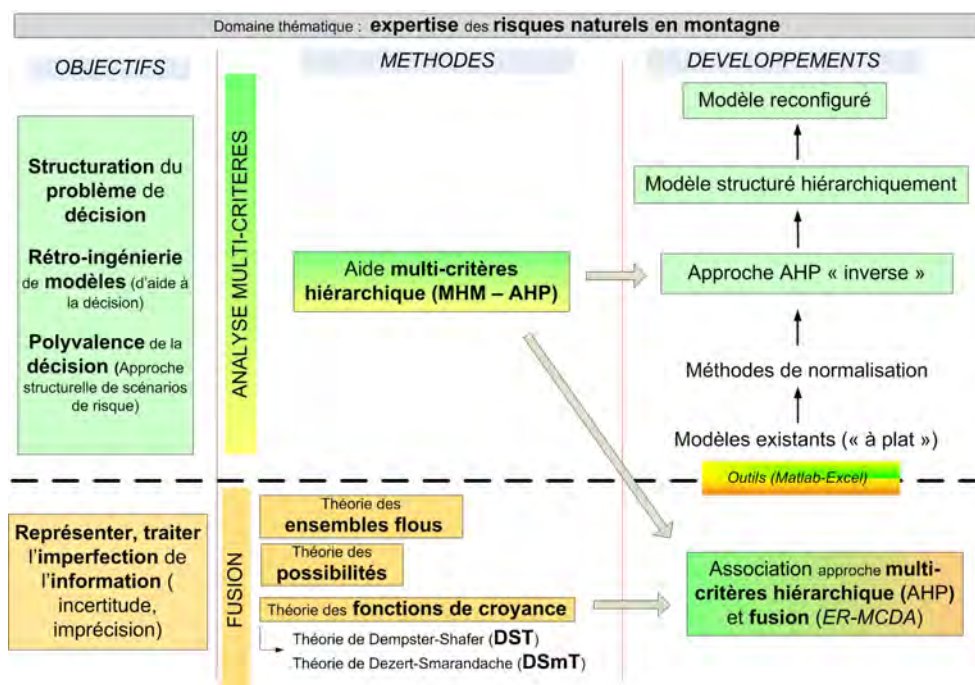


FIGURE 10.1 – Les deux volets de développements

Ce chapitre propose une analyse du travail effectué en décrivant tout d'abord les apports, les lacunes méthodologiques puis les perspectives de développement associées aux approches de reconfiguration hiérarchique et à la méthodologie *ER-MCDA*. Dans un second temps, l'intérêt

méthodologique, les manques et les développements nécessaires sont analysés dans le cadre plus global du processus d'expertise et de la gestion des risques.

10.1 Apports méthodologiques

Les apports méthodologiques concernent (FIG. 10.2) :

- le diagnostic et la reconfiguration hiérarchique d'un problème de décision ;
- l'association de l'analyse multicritères hiérarchique, de la fusion d'information et des nouvelles théories de l'incertain dans le cadre de la décision.

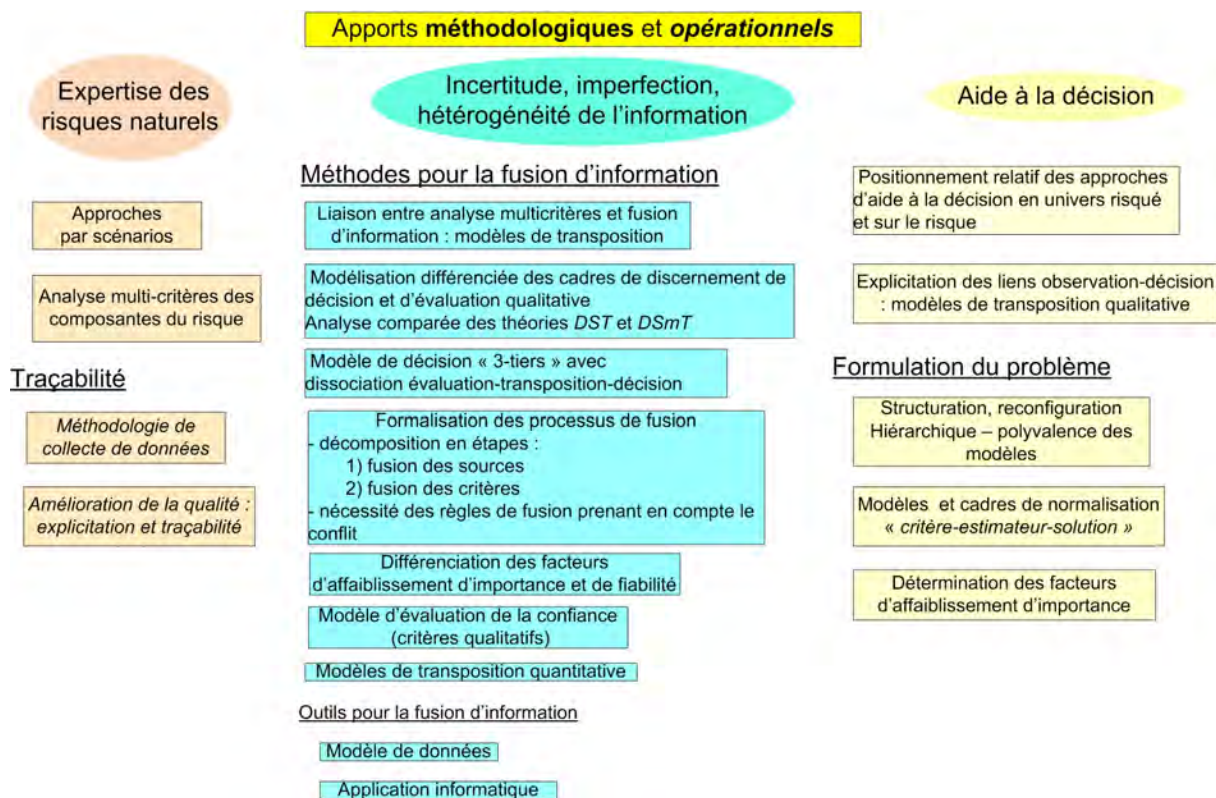


FIGURE 10.2 – Apports de la thèse : aspects méthodologiques et opérationnels

10.1.1 Formulation et reconfiguration hiérarchiques d'un problème de décision

L'analyse multicritères hiérarchique présente l'avantage reconnu d'être un moyen simple et accessible pour formaliser un problème de décision. Le modèle hiérarchique est utilisé ici comme un support conceptuel permettant d'organiser les critères et définir leurs pondérations relatives. Il est utilisé pour expliciter et capitaliser la connaissance associée à l'expertise tandis que l'identification des critères constitue également la base du modèle utilisé dans le cadre de la fusion d'information. Des développements spécifiques ont été réalisés pour exploiter, redéfinir des modèles d'aide à la décision existants et les rendre compatibles avec un processus de fusion. Ils contribuent aux objectifs d'amélioration des méthodes d'aide à la décision, d'explicitation et de capitalisation des connaissances (FIG. 10.3).



exploitables. Il existe encore de nombreuses situations où la probabilité restera subjective et arbitraire (déclenchement d'un phénomène d'avalanche, d'aggravation d'une lave torrentielle par embâcles ...).

La méthodologie proposée constitue un support méthodologique pour l'analyse de risque notamment dans les situations basées sur la combinaison et le croisement de critères impliquant des probabilités ne pouvant être que subjectives ou résultant d'évaluations imprécises et incertaines.

Dans toutes ces situations, l'approche d'analyse multicritères de *décision sur le risque* permet d'objectiver la description de facteurs potentiellement aggravants et permettre indirectement de caractériser ou d'estimer cette probabilité inaccessible directement. L'association avec la théorie des fonctions de croyance permet, de plus, d'exprimer une forme de probabilité dite pignistique.

Elle ne remplace en aucun cas les approches basées sur la modélisation déterministe et probabiliste mais doit être perçue comme un cadre complémentaire. Les approches doivent donc être utilisées de manière combinée et non exclusive.

Perspectives : développer des approches mixtes associant optimisation et approches multicritères. Des travaux récents ont étudié l'évaluation d'un risque d'atteinte par une avalanche dans le contexte d'approches bayésiennes utilisant des simulations numériques d'avalanches en présence d'obstacles (Eckert et al., 2008b). Le risque est évalué dans le cadre de la théorie classique de la décision en utilisant des fonctions d'utilité basées sur le coût des ouvrages et des dommages. Cette optimisation prend par contre en compte de manière originale et innovante la qualité et l'incertitude associées aux données décrivant les avalanches. D'autres critères qualitatifs liés par exemple à la morphologie peuvent être utilisés pour définir les zones de risques. Une perspective intéressante consisterait à associer les modèles probabilistes bayésiens mais aussi les approches hybrides et les méthodes basées sur l'analyse multicritères pour analyser le risque et exploiter à la fois les données disponibles dans un cadre statistique et les données d'expertise plus qualitatives mais tout aussi utiles. Dans ce cadre, les convergences théoriques entre la théorie des fonctions de croyances, les possibilités et les probabilités pourraient certainement être exploitées.

Méthodes de normalisation pour le diagnostic

L'approche d'aide à la décision multicritères hiérarchique (*AHP*) permet de décomposer de manière analytique un problème de décision et d'en évaluer chacune de ses composantes par parties. Cette approche exploite de manière homogène le principe de comparaison relative par paires en l'appliquant à la fois aux critères et aux alternatives au stade de l'évaluation. Cette méthode, de type *critère-solution*, nécessite la conception d'une structure hiérarchique "équilibrée". Elle exige aussi de comparer toutes les alternatives les unes avec les autres dans le cadre d'une approche dite "critère-solution", ce qui d'un point de vue pratique, peut rapidement devenir irréalisable. Les limites cognitives évoquées pour justifier le principe de la décomposition hiérarchique sont très vite atteintes dès qu'il s'agit de comparer des dizaines d'alternatives. Dans le même temps, les applications opérationnelles d'aide à la décision concernent souvent le choix, le rangement ou le classement entre un nombre important d'alternatives, comme par exemple l'analyse de sites exposés à une échelle régionale ou nationale.

La méthode *critère-estimateur-solution* est donc mieux adaptée à des systèmes existants. Dans ce cadre, la comparaison de l'ensemble des alternatives peut être faite de manière disjointe. Le modèle *critère-estimateur-solution* n'est pas innovant mais il requiert des méthodes de normalisation et d'agrégation spécifiques, adaptées au modèle critère-estimateur-solution. Des modes de normalisation spécifiques ont été développés pour prendre en compte les exclusivités

entre critères et obtenir des résultats plus intuitifs et compatibles avec des structures hiérarchiques quelconques.

Adéquation des méthodes d'agrégation

La méthode d'agrégation proposée dans le cadre de l'analyse multicritères hiérarchique (*AHP*) reste basée sur le principe d'une simple somme pondérée largement critiquable en l'état notamment en raison de son aspect compensatoire. Les méthodes d'agrégation ne permettent pas toutes de représenter les structure globales de préférences du décideur (soit la façon dont il va interpréter les évaluations, préférer une alternative à une autre). Les méthodes basées sur l'utilité additive doivent être considérées avec prudence : les phénomènes de compensation sont avérés. La méthode d'agrégation associée à la version originale de l'analyse multicritère hiérarchique (*AHP*) est également concernée avec une nuance. L'introduction d'une méthode de normalisation différente au niveau des évaluations et des critères intermédiaires (méthode de normalisation *SommeMaximum*) permet de discriminer des alternatives qui ne le sont pas dans le cadre de la méthode additive basique. Les méthodes d'agrégation mixte doivent donc être privilégiées.

Explicitation d'un raisonnement

Un modèle d'aide à la décision existant basé sur la définition de scores peut être transformé sous une forme hiérarchique. Cette structuration permet une rétro-analyse synthétique de la structure des préférences sous-jacente explicitant ainsi une partie du raisonnement des concepteurs. Au final, la méthodologie de diagnostic basée sur la transformation hiérarchique d'un modèle à plat, l'utilisation de méthodes de normalisation spécifiques et la confrontation avec une rétro-analyse des structures de préférences permet d'expliciter des hypothèses de conception et d'en valider ou infirmer les principes pour améliorer un modèle.

Structurer et reconfigurer hiérarchiquement

Utiliser la structure hiérarchique de manière conceptuelle L'analyse multicritères hiérarchique, utilisée pour évaluer les composantes du risque, présente l'avantage reconnu d'être un moyen simple et accessible pour formaliser un problème de décision. Il présente des analogies de principes avec d'autres représentations conceptuelles utilisées dans le cadre d'approches de sûreté de fonctionnement tels que les diagrammes de causes. Le modèle hiérarchique est utilisé ici comme un support conceptuel permettant d'organiser les critères et définir leurs pondérations relatives. L'identification des critères constitue ici la base du modèle utilisé dans le cadre de la fusion d'information.

Reconfigurer les modèles à plat de type critère-estimateur-solution A partir d'une structure regroupant plusieurs critères sans hiérarchie (*à plat*), la restructuration hiérarchique permet de regrouper les critères selon de nouveaux critères englobants et d'exprimer leurs poids relatifs en ayant recours à une méthode de normalisation adaptée. La répartition des poids obtenus pour chaque critère est une forme indicative des préférences entre les critères. La reconfiguration hiérarchique permet donc de comparer des modes de classement de critères alternatifs et de vérifier la cohérence des préférences en exploitant une autre présentation. Dans le cadre de l'étude des risques naturels, cette possibilité concerne des représentations sous forme de scénarios correspondant à des situations plus ou moins aggravées. Cette méthodologie permet de représenter sous une forme alternative l'incertitude associée au phénomène étudié et de prendre en compte l'existence de tels scénarios dans la décision. Cette approche peut être envisagée à plusieurs échelles dans le cadre de la conception de dispositifs d'aide à la décision de portée

étendue tels que le dispositif Sites Sensibles Avalanches mais aussi à une échelle plus locale, pour comparer et choisir des stratégies de protection en fonction de scénarios de phénomènes.

10.1.2 Associer fusion d'information et aide à la décision multicritère hiérarchique

Le risque peut être évalué selon ses principales composantes associées à la définition de l'aléa et de la vulnérabilité. L'approche *ER-MCDA* permet :

- la prise en compte dans un même contexte de l'importance des critères, l'imprécision associée à leur évaluation et de la fiabilité des sources ;
- la formalisation du lien entre l'évaluation des critères et la décision par le biais des modèles de transposition ;
- la fusion des évaluations transposées au niveau de chaque critère ;
- la fusion globale des critères pour la décision en explicitant l'incertitude associée au choix du niveau retenu.

Cette approche contribue aux objectifs de représentation et de traitement de l'information imparfaite, d'explicitation et de capitalisation des connaissances et d'aide à la décision (FIG. 10.4)

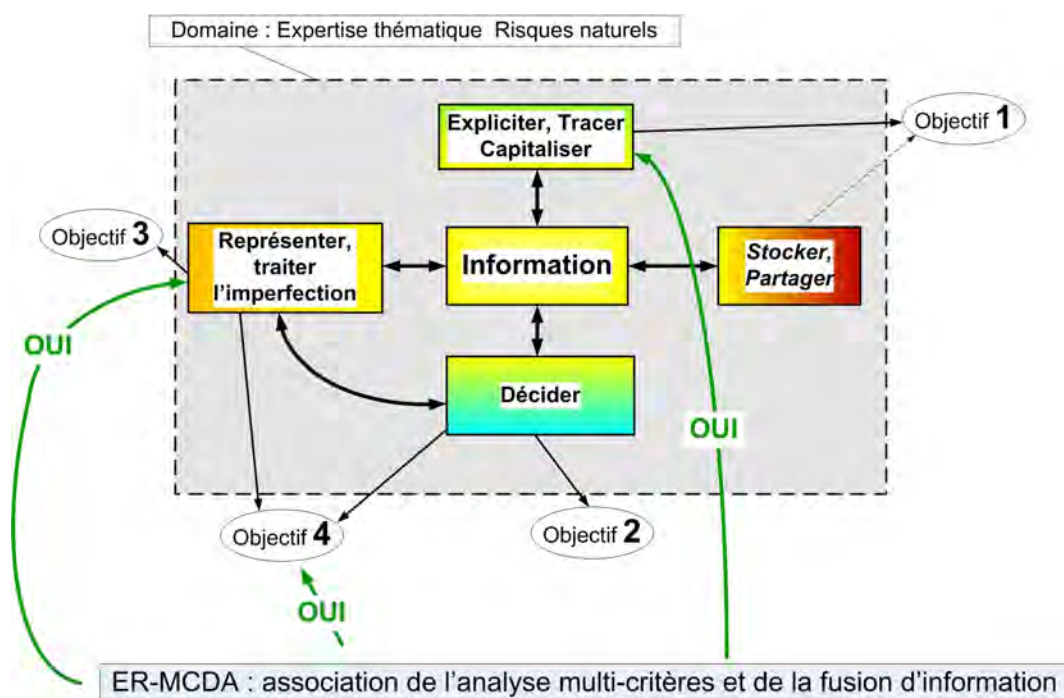


FIGURE 10.4 – Contribution aux objectifs du volet relatif à l'association de l'analyse multicritères et de la fusion d'information

Les apports méthodologiques sont décrits ci-dessous :

Confronter les approches d'aide multicritères et de fusion

La vision descriptive du processus de décision et l'hypothèse d'une structure de préférence globale sur lesquelles reposent les méthodes d'agrégation totale, sont compatibles dans leur principe avec le cadre de la fusion d'information. Cette convergence de principe est mise en évidence de manière plus nette que les développements existants dans la littérature. Les préférences exprimées par le décideur et l'incertitude associée à l'évaluation sont deux aspects différents de la décision basée sur une information imparfaite. Notre approche dissocie nettement ces deux

étapes. Les modèles de transposition basés sur l'utilisation des théories des ensembles flous et des possibilités peuvent être rapprochés des fonctions d'utilité exploitées dans le cadre de la théorie de l'utilité multi-attribut (*MAUT*). L'avantage consiste à expliciter le mode de construction de la structure de préférence des experts en lien avec la problématique de décision apportant une contribution en terme de traçabilité des raisonnements.

Ceci amène par contre un certain nombre de questionnements relatifs à la prise de décision. La première phase de la méthode, correspondant à la fusion des avis exprimés par les sources, est une nouvelle manière de décrire l'imperfection de l'information associée à l'évaluation. L'interprétation en terme de décision résultant de la fusion des critères est cohérente. Notre modèle établit, dès les critères de base, une correspondance avec la décision finale avec cependant une exigence cognitive très forte de la part de l'analyste.

La question est donc de savoir à quel moment il faut agréger l'information. Est-ce que la caractérisation de l'imperfection n'est pas finalement un nouveau critère à prendre en compte dans la décision ?

Formuler un problème de décision et de fusion : agréger et/ou fusionner

La formalisation d'un problème de décision et de fusion constituent respectivement des étapes délicates du raisonnement. La méthodologie proposée détaille le cheminement et propose une correspondance opérationnelle entre deux cadres différents. Dans le principe, l'agrégation mise en œuvre dans le contexte de l'analyse multicritères hiérarchique est finalement remplacée par la fusion de critères. Le résultat final est simple dans son principe mais a nécessité de nombreuses tentatives avant d'y parvenir. A l'arrière-plan, il se pose néanmoins la question de la différence fondamentale entre les processus d'agrégation et de fusion qui n'a pas été abordé d'un point de vue théorique.

Transposer, fusionner et décider

Le principe partagé d'un cadre commun d'évaluation. Dans les méthodes d'aide multicritères à la décision, l'agrégation est un moyen de combiner des critères ayant une importance variable dans le processus de décision. L'agrégation complète produit un critère ou indice unique de synthèse qui n'est qu'une valeur indicative et relative pour comparer les alternatives envisagées entre elles. Dans ce cadre, la méthode d'analyse hiérarchique multicritères (*AHP*) s'avère originale par son principe d'évaluation comparative des critères qualitatifs, quantitatifs utilisant une échelle commune. Ainsi, des grandeurs numériques, des classes qualitatives sont transformées dans une échelle numérique. Cette échelle établit une correspondance entre l'évaluation d'un critère et son exploitation en vue d'une décision : c'est le moyen de "transposer" une analyse faite sur la contribution d'un critère à la décision dans un cadre commun dans le même esprit qu'une fonction d'utilité dans le cadre de la théorie *MAUT*¹.

La fusion d'information permet quant à elle d'évaluer la "vérité" associée à l'information provenant de plusieurs sources proposant des évaluations imprécises, incertaines et de fiabilité variable. Elle ne peut concerner que des informations concernant la même grandeur ou les mêmes hypothèses et appartenant au même cadre de discernement. La démarche *ER-MCDA* exploite cette nécessité partagée d'un cadre commun pour décider ou évaluer l'information.

Les trois étapes clés de l'approche ER-MCDA. L'association de la fusion et de l'analyse multicritère hiérarchique implique trois étapes successives visant à transposer, fusionner, interpréter et décider :

1. Théorie de l'utilité multi-attribut

- la transposition concerne l’expression des critères dans un cadre commun relatif à la décision à prendre : comment le critère contribue-t’il à la prise de décision ? La ”transposition” répond à cette question essentielle et constitue une spécificité de la méthodologie *ER-MCDA*. Le lien avec décision s’établit à ce niveau. Cette transposition peut s’opérer à destination de classes qualitatives (faible, moyen, forte) mais aussi plus généralement vers toute échelle de notation ordinale traduisant par exemple des niveaux de gravité, d’urgence L’évaluation, caractérisée par un niveau d’imprécision et une fiabilité variable de la source productrice, peut être exploitée et utilisée au travers de différents modèles de transposition. C’est au niveau de ces modèles de transposition que se trouve encapsulée le raisonnement et l’analyse de l’expert quant à la contribution du critère à la décision.
- la fusion permet de combiner les informations transposées dans le cadre de décision commun, caractérisées par leur niveau d’incertitude et leur imprécision dans le choix de la classe d’évaluation de la décision ;
- la décision correspond à l’interprétation des résultats de la fusion d’information en prenant en compte la qualité (”vérité”) de l’information disponible.

Utiliser un cadre théorique et des règles de fusion gérant le conflit

Par rapport aux approches existantes, notamment l’approche *DS/AHP* (Beynon et al., 2000), la méthodologie *ER-MCDA* envisage un problème de décision plus complexe associant des critères qualitatifs mais aussi quantitatifs. Le cadre de discernement est constitué non pas par des alternatives mais pas les classes de décision. En ce sens, les étapes de la méthode nous semblent plus clairement définies :

- Définir les classes de la décision ;
- Identifier pour chaque critère, une correspondance (grâce aux modèles de transposition) entre les évaluations et les classes de décision ;
- Faire évaluer les critères par chaque source et fusionner les évaluations ;
- Fusionner les évaluations au niveau de chaque critère ;

Dans notre approche, les méthodes et processus de fusion sont basés sur les avancées et résultats récents obtenus dans le domaine de la fusion d’information. Le choix d’un cadre théorique et des règles de fusion gérant le conflit est à la fois indispensable et nouveau par rapport aux travaux antérieurs. Le résultat produit pour chaque critère une répartition de masses de croyance entre les classes d’évaluation. On a donc une description de l’incertitude associée à l’information. Est-ce que ce critère contribue de manière certaine, catégorique à la décision ? L’interprétation et le choix des règles de décision reste cependant un problème. Une nouvelle piste est introduite pour exploiter les résultats de la fusion dans le cadre d’une approche d’aide multicritères à la décision basée sur une approche de sur-classement.

L’apport du cadre de la *DSmT*

Dans le contexte de l’analyse des risques naturels, l’information et la connaissance sont souvent décrites comme partielles, incertaines et mises en œuvre dans le cadre d’approches très qualitatives. Le support théorique de manipulation de l’information reste cependant de manière quasi exclusive limité à la théorie des probabilités. Les nouvelles théories de l’incertain permettent de décrire et prendre en compte les informations imprécises, vagues et incertaines dans le cadre des théories des ensembles flous, des possibilités et enfin des fonctions de croyances au travers de la théorie de *Dempster-Shafer* (*DST*) et/ou de la théorie de *Dezert-Smarandache* (*DSmT*). Sur ce point, la théorie (*DSmT*) et l’utilisation de règles de fusion gérant le conflit telles que les règles permettent d’obtenir des résultats de fusion plus intuitifs.

La fusion opérée à deux niveaux permet d’obtenir une information sous forme de jeux de masses de croyance réparties entre les différentes classes d’évaluation du cadre de discernement

de décision. La dernière étape de fusion considère les critères comme des sources d'information et met en évidence un verrou scientifique associé à la prise en compte différenciée de l'importance et de la fiabilité des sources. Une proposition de méthode est faite pour distinguer au moyen de facteur d'affaiblissement spécifique la fiabilité des sources d'évaluation et l'importance des critères dans le processus de fusion. La modélisation des cadres de discernement se fait selon les cadres théoriques de la *DST* et de la *DSmT*. L'utilisation des règles de fusion gérant le conflit telle que la règle PCR6 et le cadre théorique de la *DSmT* permettent de produire des décisions acceptables même dans les configurations de fort conflit. La méthodologie constitue une première base mais soulève un grand nombre de questions et doit faire l'objet de développements : seuls quelques scénarios sont testés et une analyse de sensibilité doit être menée pour analyser et comparer les différents ordres de fusion, les règles et modes de fusion.

La détermination des masses de croyance est basée sur une méthode certes contestable mais totalement explicite. Au niveau du processus de fusion, la méthodologie proposée présente à notre avis deux intérêts principaux. Le premier intérêt concerne la distinction entre l'importance et la confiance dans le processus. Elle confirme la nécessité de cette distinction dans le processus de fusion et d'évaluation notamment pour les critères qualitatifs. Elle introduit le principe de facteur d'affaiblissement d'*importance* par rapport aux classiques facteurs d'affaiblissement relatifs à la *fiabilité*. Le second intérêt réside dans la conception de la méthode basée sur une double fusion au stade de l'évaluation entre les sources réelles de l'information puis au niveau des critères assimilés à des sources. Dans ce cadre, la méthode permet la prise en compte effective de plusieurs sources potentiellement conflictuelles. Le conflit est géré soit au travers d'une modélisation basée sur la *DSmT*, soit au travers de règles de fusion avancées prenant en compte et gérant le conflit entre les sources dans le cadre de la *DST*.

Dissocier l'évaluation et le traitement de l'information

Par rapport aux approches existantes associant la théorie des fonctions de croyance et l'analyse multicritères hiérarchique telle que la méthode *DS/AHP* (Beynon et al., 2000), la dissociation de l'évaluation et du traitement de l'information est un principe méthodologique essentiel pour le développement d'outils d'aide à la décision dans le domaine des risques. L'approche proposée peut s'apparenter à une approche de décision 3 – tiers² qui sépare nettement l'évaluation des critères et leur contribution à la décision et repose sur trois phases distinctes et dissociées (FIG. 10.5) :

- tout d'abord, l'évaluation de critères quantitatifs et qualitatifs est effectuée par rapport aux véritables valeurs observées, indépendamment du modèle de décision utilisé : le nombre d'habitants, les surfaces sont évaluées sous forme d'intervalles et de niveaux de confiance. L'appartenance à des classes qualitatives est également caractérisée par une confiance dans l'évaluation ;
- ensuite, le modèle de transposition établit ensuite une correspondance avec le cadre de décision. Il joue en quelque sorte le rôle d'une pseudo fonction d'utilité mais de manière beaucoup plus explicite. Ce modèle de transposition encapsule le savoir-faire et la connaissance experte en définissant le lien entre les classes d'évaluation du critère (gammes de pente, de longueur ...) et les classes de décision (type de phénomène, niveaux d'intensité, de risque) utilisables de manière opérationnelle ;
- enfin, le processus de fusion permet de définir la classe de décision qui correspond le mieux aux évaluations des critères en mettant en évidence la confiance dans le classement retenu. Il est possible de savoir si la classe retenue résulte d'un consensus entre des sources certaines de leurs évaluations ou bien de sources conflictuelles, imprécises et incertaines.

2. par analogie avec le principe d'architecture 3 – tiers des systèmes informatiques distribués

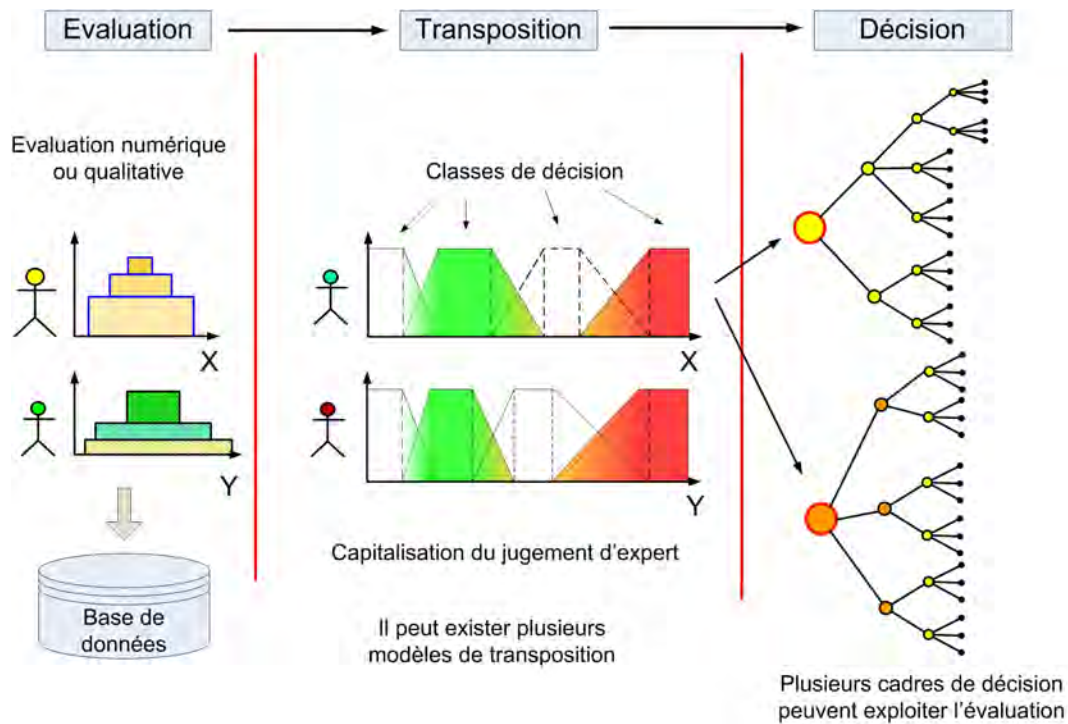


FIGURE 10.5 – Dissocier l'évaluation et la décision

D'un point de vue opérationnel, cette approche présente l'intérêt de collecter les informations non par rapport à un quelconque modèle d'aide à la décision mais par rapport à une observation réelle. Elle enrichit les développements réalisés dans d'autres domaines tels que, par exemple, celui du diagnostic de barrages hydrauliques basé sur des échelles de notes de gravité (Curt, 2008). Par rapport à ces échelles de notes, le modèle de transposition permet à la fois de décrire les hypothèses mais aussi de dissocier l'observation et l'interprétation. Dans notre modèle, l'évaluateur analyse directement une grandeur numérique (une pente, une largeur de fissure). Ses observations réelles sont conservées dans le modèle et restent accessibles. Rien n'empêche par la suite d'appliquer différents modèles de transposition correspondant à d'autres interprétations du modèle. Les données originales peuvent donc être réutilisées dans plusieurs cadres de décision et contextes de risques naturels Cette structure de modèle de décision en trois-tiers permet donc une meilleure valorisation des données, une capitalisation et une explicitation de la connaissance experte et une polyvalence dans la décision.

Rapprocher la décision de l'évaluation

La méthodologie *ER-MCDA* analyse et explicite, en fait, la décision générale au niveau de chaque critère. Dans le cadre de la démarche classique *AHP*, les poids affectés aux alternatives sont déterminés par rapport aux préférences entre alternatives pour le dit critère : *"par rapport à ce critère, cette alternative est aussi, moins . . . importante ou préférée que cette autre alternative*. La décision finale sous-tend cette analyse sans être explicite. Le modèle *ER-MCDA*, au travers des modèles de transposition établit une correspondance directe entre les classes d'évaluation de la décision (par exemple, un niveau de risque faible, moyen, fort) et l'évaluation numérique ou quantitative du critère.

Analyser le cadre de mise en œuvre

Au-delà de la conception de la méthodologie, la mise en œuvre de la méthode a exigé un double développement permettant d'une part de traiter le problème d'analyse multicritères hiérarchique et, d'autre part, l'évaluation des critères, leur fusion et la production de résultats de synthèse sous forme graphique. La disponibilité de tels outils est une contrainte importante pour la mise en œuvre et le déploiement de ce type d'application. Il n'existe en effet que très peu d'environnements de calcul adaptés à la manipulation de la théorie des fonctions de croyance et notamment de la théorie de Dezert-Smarandache (*DSmT*).

La démarche de conception de l'application développée sous Matlab® a consisté à structurer les données pour permettre de formuler notre problème et développer une application évolutive³. L'application n'a qu'un statut de prototype mais fournit une base de départ en proposant notamment des représentations graphiques des données et des résultats. Le développement d'un prototype a permis de définir les principes de conception en vue d'un traitement paramétrique des différents processus de fusion qui n'a malheureusement pas pu être réalisé dans le cadre de ce travail, constituant donc une perspective de développement.

10.2 Perspectives méthodologiques

Les lacunes méthodologiques sont analysées et mises en perspectives pour chacun de deux axes de développement correspondant à la reconfiguration hiérarchique et à l'approche *ER-MCDA* (FIG. 10.9).

10.2.1 Méthodes de reconfiguration et modèles hiérarchiques

Le modèle hiérarchique est à la fois une force et une faiblesse de la démarche analytique

L'analyse hiérarchique est un moyen naturel et polyvalent d'analyse d'un problème décisionnel. Les études de psychologie cognitive montrent que l'esprit humain ne peut manipuler et comparer entre eux qu'un nombre limité de concepts (Miller, 1994). La démarche analytique basée sur la décomposition en critères correspond donc à une nécessité pour le raisonnement. Dans le même temps, l'importance et l'influence de la modélisation du système est une évidence : la réponse ou la décision proposée est totalement dépendante des hypothèses du modèle de décision. Omettre un critère essentiel conduira à un modèle dont l'utilité sera contestable. La méthodologie ne permet pas de s'affranchir de ce type d'erreur. Elle offre, par contre, la possibilité de réutiliser dans des contextes de décision différents, les critères et leurs classes d'évaluations.

Les modèles de normalisation sont spécifiques à la méthode

Les modèles de normalisation développés et mis en œuvre correspondent à une configuration dans laquelle on dispose initialement d'un modèle d'inspiration multicritères où les poids sont affectés de manière arbitraire et absolue sur chacun des critères. Les méthodes de normalisation proposées permettent de transformer ce type de structure dit "à plat" sous la forme d'une ou plusieurs structures hiérarchiques interchangeables et correspondant à la même pondération des critères terminaux. Dans le même temps, l'approche *ER-MCDA* se base sur une structure de critères considérés à plat et implique donc d'agréger les poids des critères pour les utiliser dans le modèle. En raison des différentes méthodes de normalisation utilisées, les poids calculés ne sont pas normalisés au sens classique du terme (leur somme est différente de 1).

3. Les routines de calcul ont été fournies par Arnaud Martin (Martin, 2009)

La rétro-analyse des préférences n'est pas univoque

La démarche de diagnostic proposée analyse en retour les préférences des analystes ayant conçu un modèle d'aide à la décision dans les cas où ce modèle résulte d'une approche empirique avec des poids affectés de manière arbitraire aux différents critères. La méthode utilisée reste manuelle et correspond à la recherche de préférences entre critères permettant de s'approcher autant que possible de la structure de pondération existante. Une analyse mathématique plus rigoureuse permettrait de déterminer les conditions dans lesquelles on peut réellement procéder à ce type d'inversion de manière systématique.

Perspective : confronter les méthodes et les modes d'agrégation

L'analyse et le diagnostic des modèles d'aide à la décision se sont concentrés sur la méthode hiérarchique multicritères pour son intérêt au stade de la formulation du problème et sa proximité avec de nombreuses méthodes empiriques. Son mode d'agrégation est cependant reconnu comme basique et limité. D'autres méthodes d'agrégation évoquées mais non utilisées (forme multiplicative de l'*AHP*, agrégation mixte) doivent être envisagées dans le cadre d'applications d'aide à la décision.

De manière générale, il est en effet indispensable de confronter plusieurs méthodes pour répondre à un problème d'aide à la décision. Dans sa conception, la méthode hiérarchique repose sur une agrégation complète et ne constitue pas une méthode universelle. Basée sur une technique d'agrégation complète, elle correspond avant tout à une problématique de choix et suppose que l'ensemble des critères peut être évalués selon une échelle unique, impliquant d'exprimer des préférences entre tous les critères. Dans les cas d'incomparabilité de critères, les méthodes de sur-classement autorisent des comparaisons partielles et l'introduction de niveaux de préférence de manière beaucoup plus fine. Un cadre méthodologique rigoureux d'étude de sensibilité de ces méthodes serait un complément important en vue d'une meilleure mise en œuvre et analyse des résultats.

10.2.2 La méthodologie *ER-MCDA*

Fusionner les évaluations ou les décisions

La transposition est une quasi-décision : en effet, cette transposition établit le lien entre l'évaluation et les classes d'évaluation de la décision. Une variable numérique évaluée par une distribution de possibilité est directement liée à des classes de décision prédéfinies. Une fois transposée, ce ne sont plus que des jeux de masses exprimés sur le cadre de décision qui sont manipulés.

Perspective : fusionner les évaluations. Cette démarche consisterait à fusionner les évaluations quantitatives et qualitatives avant d'effectuer la transposition. Elle présenterait l'intérêt de fournir une information fusionnée sur les grandeurs qualitatives ou quantitatives réelles. Dans le cadre des évaluations exprimées sous la forme de distributions de possibilités, on peut comparer les méthodes de fusion de distributions de possibilités et les méthodes issues de la théorie des fonctions de croyance après transformation en jeu de masses de croyance. À noter ici que la mise en œuvre de cette fusion nécessite alors le développement d'algorithmes non triviaux pour gérer les intersections entre intervalles dans le cadre des théories *DST* ou *DSmT*.

Décider ou raisonner

Une approche statique des composants de la décision La formulation de l'expertise sous la forme d'un problème de décision hiérarchique consiste à décrire les critères pris en compte

dans la décision, à définir leur importance puis à agréger l'évaluation des critères. La décision se réfère à une problématique de choix, de rangement, de classement entre des alternatives, des niveaux de classement. La description des critères de décision est statique : ils sont tous évalués pour une ou chacune des alternatives envisagées. Les tentatives passées de développement de systèmes experts dans le domaine des risques naturels ont montré leurs limites. La démarche s'est volontairement focalisée sur la description de l'information de base utilisée pour la décision en proposant des méthodes pour évaluer, mesurer l'imperfection de l'information et décrire le lien avec une décision.

Perspective : prendre en compte l'imperfection dans un raisonnement La logique floue constitue une autre approche du raisonnement défini comme la production de nouvelles connaissances à partir de connaissances existantes (Bouchon-Meunier and Marsala, 2003). Dans le cadre du diagnostic de barrages hydrauliques (Curt, 2008), la logique floue combine des distributions de possibilités correspondant à l'évaluation de notes pour définir une nouvelle note correspondant à une caractéristique plus générique. Par exemple, l'état des dispositifs de drainage et d'étanchéité caractérise la fonction globale de drainage d'un barrage qui peut entraîner un risque d'érosion interne. Dans ce cadre, la fusion d'information et la théorie de *Dempster-Shafer* sont utilisées pour caractériser la qualité variable des sources d'information. Cet aspect dynamique et logique n'existe pas dans le cadre d'une approche d'aide multicritères à la décision où l'information est agrégée sans application de règles logiques.

Au final, les deux approches présentent des complémentarités pour décrire et améliorer le processus d'expertise dans le domaine des risques naturels. Les rapprocher offrent deux perspectives :

- d'une part, la théorie de *Dezert-Smarandache (DSmT)* peut avantageusement remplacer la théorie de *Dempster-Shafer* pour fusionner les informations produites par les sources d'évaluation (les experts) et prendre en compte des évaluations quantitatives et qualitatives ;
- d'autre part, il serait intéressant d'étudier l'agrégation directe de distributions de possibilités pondérées par l'importance des critères.

Le caractère arbitraire des modèles de transposition

Les modèles de transposition constituent le point clé pour faire correspondre l'analyse multicritère et un cadre de fusion. Des méthodes ont été proposées pour tenter d'associer les deux approches. Ils sont certainement un des points les plus perfectibles ou discutables de la méthodologie et offrent des perspectives de développement importantes au niveau théorique.

Les intervalles flous sont choisis arbitrairement. Dans l'exemple, les intervalles flous imprécis (trapézoïdaux) sont choisis a priori sur la base de valeurs guide définies dans le modèle initial. La détermination des bornes de ces intervalles flous est une des étapes essentielles de la définition du modèle. A ce stade, l'expert-analyste établit une correspondance directe entre l'évaluation et la décision. Ce lien peut être défini en prenant en compte une certaine imprécision et résulte la plupart du temps d'une confrontation entre plusieurs experts. Le modèle de transposition unique est donc probablement une simplification trop brutale et assez peu fidèle par rapport à la réalité. Les solutions proposées restent certainement perfectibles et posent un certain nombre de questions notamment sur les liens entre les différents formalismes théoriques et sur la validité des transferts de masse de croyance entre des intervalles numériques et des classes d'évaluation représentées par des intervalles flous. Par exemple, à l'heure actuelle, les masses transposées à partir d'intervalles numériques issues de distributions de possibilité sont

finalement sommées pour obtenir une masse dans le cadre de discernement commun. La structure obtenue a les propriétés d'une masse de croyance mais ce principe est-il valide ? est-il le seul possible ?

Perspective : Fusionner les modèles de transposition. Pour améliorer cet aspect, la démarche imaginée mais non appliquée dans le cadre de ce travail consiste à fusionner les définitions de chacun des intervalles définis par leur noyau et leur support (FIG. 10.6). Les intervalles définissant le noyau et le support sont définis par des distributions de possibilités : chaque intervalle emboîté est associé à une mesure de nécessité définissant la confiance dans l'intervalle retenu. Au final, on obtient donc des surfaces correspondant à une répartition variable de confiance. Le principe proposé repose toujours sur des ratios surfaciques. On effectue la transposition avec les intervalles non seulement sur la base des intervalles flous correspondant aux classes de décision mais aussi, pour chaque classe de décision, sur la base des intervalles flous emboîtés. De cette manière, on peut représenter des zones de l'intervalle flou correspondant à une confiance moindre. Dans ce cas, la masse provenant de l'intervalle d'évaluation n'est pas directement affectée à la classe de décision considérée.

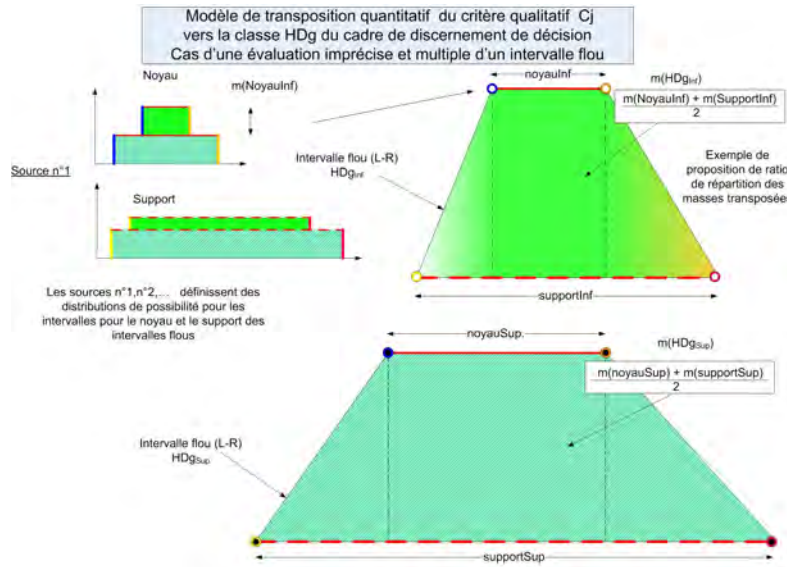


FIGURE 10.6 – Principe d'un modèle de transposition quantitatif multi-sources

La difficulté d'évaluation des critères qualitatifs

La détermination des poids qualitatifs est discutable. La détermination des masses de croyances est une difficulté liée à l'utilisation de la théorie des fonctions de croyance. Pour expliciter des probabilités "subjectives", la méthode de comparaison par paires proposée par l'AHP peut être utilisée (Millet and Wedley, 2002)(Ozdemir and Saaty, 2006). Le principe de passage d'une structure de préférences basées sur des poids normalisés vers un jeu de masse de croyance est acceptable si les poids w_j vérifient les propriétés requises ($\sum_j w_j = 1$ et $w_j \in [0, 1]$) (Yager, 2008). Dans notre cas, c'est plutôt la méthodologie permettant d'obtenir les poids qui est contestable. Dans le cadre de la DSmT notamment, la matrice de comparaison par paires est conçue pour ne comparer que certains éléments entre eux, induisant du même coup un ratio de cohérence en dehors des limites habituellement tolérées. Ce problème existe dès les premières tentatives d'association d'approches hiérarchique multicritères et de la fusion (Beynon et al., 2000).

Perspective : utiliser d'autres méthodes d'expression des préférences et des masses.

La méthode de détermination des masses de croyances en les dérivant de poids via une matrice de comparaison par paires pour des critères qualitatifs reprend les principes énoncés dans les premières versions associant la théorie de Dempster-Shafer et l'*AHP* (Beynon et al., 2000). Cette solution n'est pas idéale car les règles de cohérence ne sont plus respectées. Il serait possible de tester d'autres approches que la méthode basée sur le calcul du vecteur propre pour dériver des pondérations à partir de matrices de comparaison par paires (Smith, 2004). Il faudrait également tester d'autres méthodes purement qualitatives pour définir les masses de croyance telles que celle proposées par (Bryson et al., 1994)(Wong and Lingras, 1994) : il s'agit ici d'encadrer progressivement la valeur de la masse de croyance à partir de descriptions verbales choisies sur une échelle à plusieurs niveaux.

Perspective : utiliser des méthodes de fusion qualitative. Pour les critères qualitatifs, l'approche mise en œuvre repose sur le principe d'expression sous une forme numérique de critères qualitatifs (transposition qualitative). Les masses issues de ce processus qualitatif ne sont pas fusionnées dans la méthodologie proposée. Des approches de fusion qualitatives récemment développées dans le cadre de la *DSmT* pourraient être testées dans le cadre de notre problématique (Dezert and Smarandache, 2009). Une difficulté demeure cependant pour mettre en œuvre les calculs, ces méthodes ne profitant pas, à notre connaissance, d'environnement de calcul comme dans les approches quantitatives.

Gérer l'importance, l'incertitude, l'imprécision et la fiabilité

Les facteurs d'affaiblissement de fiabilité sont arbitraires. Les facteurs d'affaiblissement de fiabilité utilisés dans la première phase de fusion pour affaiblir les sources des évaluations quantitatives sont définis de manière arbitraire dans le modèle. La fiabilité d'une source (d'un expert, d'une base de données) peut cependant être estimée en fonction de critères tels que l'expérience, les conditions d'expertise ... (Tacnet et al., 2006) .

Perspective : développer des modèles d'analyse de la confiance en amont du modèle ER-MCDA. La définition d'indices de confiance (ou de fiabilité) décrivant les différentes sources du modèle *ER-MCDA* est envisagée en connectant des approches multicritères en amont du modèle *ER-MCDA*. Ces analyses permettraient de définir non seulement les facteurs d'affaiblissement exploitables dans la méthode mais aussi de fournir des évaluations de la qualité globale des sources dans le cadre d'une approche qualité globale du processus d'expertise.

Différencier importance et incertitude. Par nature, les processus de fusion visent à exprimer un degré de vérité sur des propositions et pas à analyser des importances (ou préférences) relatives entre elles. Dans notre méthodologie, l'analyse multicritère sert à structurer et formuler le problème de décision. Une correspondance est établie entre les critères et le cadre de discernement de décision.

Au premier stade de la méthodologie *ER-MCDA*, la fusion est tout à fait adaptée. On obtient la contribution de chaque critère à la décision en mettant en évidence la croyance attribuée à chacune des classes d'évaluation de la décision et aussi l'incertitude liée à l'évaluation.

La deuxième étape de fusion des critères considérés comme des sources pose un problème pour prendre en compte l'importance des sources sans la confondre avec l'incertitude. Les résultats sont tous exprimés dans le même cadre de discernement commun (c'est tout l'objet de la démarche) et la fusion est légitime dans son principe. Les approches existantes ont contourné ou ignoré ce problème en utilisant le facteur d'affaiblissement de fiabilité pour gérer les importances relatives (Beynon, 2005a). A défaut d'autres méthodes, nous avons aussi utilisé ce principe pour

nos applications. Cette option n'apparaît pas satisfaisante dans son principe. Elle correspond à une utilisation dévoyée du facteur d'affaiblissement et ne nous paraît pas complètement adaptée pour gérer de manière différenciée l'importance et l'incertitude ou la fiabilité des sources. Une proposition d'un facteur d'affaiblissement d'importance basée sur un transfert de masse de croyance sur l'ensemble vide fournit un résultat qui n'est pas inintéressant mais qui pose un problème dans son interprétation théorique car elle attribue une masse à l'ensemble vide et diminue donc artificiellement les masses des autres éléments. Tout d'abord, cette tentative n'a de sens et ne fonctionne que dans le cadre de la *DSmT* en utilisant les règles répartissant le conflit de manière proportionnelle. Le résultat obtenu peut être interprété en distinguant une part d'importance différentielle et d'ignorance attribuée respectivement à l'ensemble vide (\emptyset) à Θ . Une solution pourrait être d'arrêter le processus de fusion après la première étape et de considérer la répartition des masses entre les classes d'évaluation comme un nouveau critère à prendre en compte dans une agrégation multicritère classique. C'est dans cet esprit que l'utilisation de méthodes de sur-classement a été proposée. Abandonner la fusion d'information pour produire la décision globale nous apparaît néanmoins prématuré et regrettable. L'idée d'une règle de répartition proportionnelle des masses basée non pas sur les masses des éléments focaux mais sur des facteurs d'importance pourrait être étudiée. Il s'agirait d'une règle de fusion associant des principes des règles *PCR*⁴ (règle de répartition proportionnelle du conflit) ou *WAO* (Weighted Average Operator)(Lefevre et al., 2002) et ceux des règles de type *OWA* (ordered weight aggregation) développées dans le cadre d'agrégation multicritères (Yager, 1988, 2008).

Le choix d'un processus de fusion

Peu de processus de fusion sont testés à l'heure actuelle Les processus de fusion correspondent à une combinaison de choix relatifs au cadre de discernement, aux théories utilisées pour transposer et ou produire les évaluations (*DST*, *DSmT*), aux règles de fusion (*Dempster*, *PCR6*, ...) au mode (statique ou dynamique) et à l'ordre de fusion. Les processus de fusion testés sont peu nombreux et ne permettent qu'une mise en évidence partielle du fonctionnement de la méthodologie.

Perspective : analyse de sensibilité sur les méthodes de fusion. L'implémentation de l'outil de calcul permet d'effectuer ces comparaisons. Ce choix a été privilégié au détriment d'une analyse de quelques cas simples. Une analyse de sensibilité devra être faite pour tester les paramètres de la fusion et aussi les résultats en fonction de données d'évaluation plus extrêmes mettant en évidence des conflits marqués entre évaluations par exemple.

Produire une décision effective

Les décisions obtenues par fusion ne sont pas classées. La fusion des jeux de masses de croyances transposés provenant des évaluations produit des résultats sous forme de valeurs de masse ($m(.)$), de crédibilité ($Bel(.)$), de plausibilité ($Pl(.)$) ou de probabilité pignistique ($BetP$). Pour chaque alternative, on dispose donc de série de valeurs affectées aux classes d'évaluation de la décision générale. Pour décider, on peut utiliser les règles classiques de la fusion basée sur le choix de la classe présentant le maximum de crédibilité (décision pessimiste), de plausibilité (décision optimiste) ou de probabilité pignistique (décision de compromis). Ceci peut ensuite servir de base pour établir un classement entre des alternatives évaluées par la méthodologie *ER-MCDA*.

4. Proportional Combination Rule (Dezert and Smarandache, 2006)

Décider sur la base des résultats de la fusion La question de la différenciation de l'importance, de l'incertitude et de la précision a introduit la délicate question de l'interprétation des résultats et de la décision. La démarche *ER-MCDA* introduit la qualité de l'information comme un critère supplémentaire pour la décision : sachant que les informations dont on dispose sont incertaines et imprécises, doit-on prendre la même décision que dans le cadre d'informations certaines ? Doit-on utiliser la fusion d'information pour produire la décision ou doit-on combiner l'information relative à la qualité de l'information comme un nouveau problème de décision multicritères ? Ce choix du principe de décision revient normalement au décideur. Deux cas sont possibles :

- la démarche *ER-MCDA* exploite la fusion jusqu'à produire une évaluation de synthèse avec la difficulté évoquée plus haut quant à la différenciation de l'importance et de la qualité de l'information ;
- une autre approche évoquée à titre de perspective consisterait à réinterpréter dans le cadre d'une analyse multicritères d'agrégation partielle les résultats du premier niveau de fusion.

Perspective : introduire les méthodes de sur-classement Les quelques exemples d'application numériques présentés permettent de produire des résultats pouvant être interprétés en vue du choix de la classe d'évaluation à affecter à l'alternative étudiée. On peut néanmoins imaginer d'analyser plus globalement les résultats de la première étape de fusion des jeux de masse de croyance transposés. L'utilisation de méthodes de sur-classement à ce stade nous paraît être une solution intéressante. Elle reviendrait donc à supprimer la seconde phase de fusion et à analyser dans un cadre multicritères les résultats de la fusion. Ceci permettrait de résoudre partiellement le problème de distinction entre importance et fiabilité.

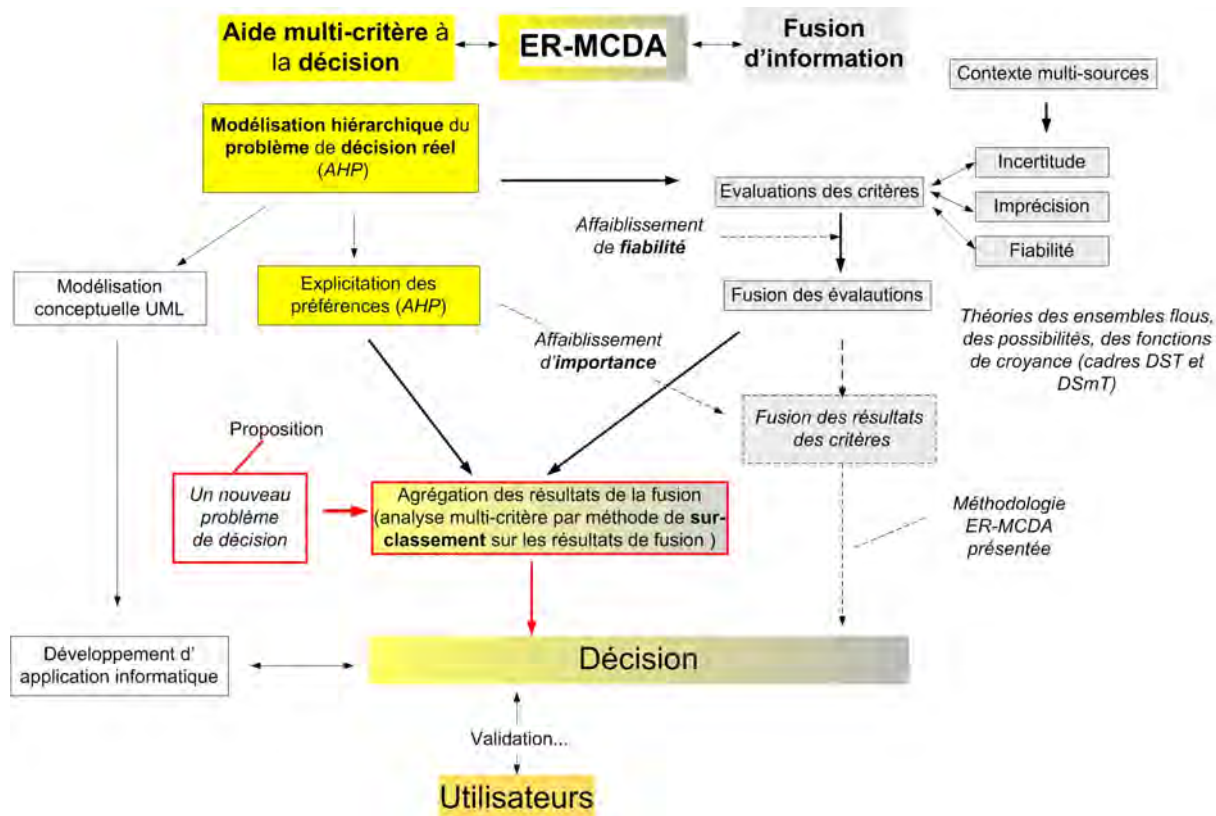


FIGURE 10.7 – La démarche ER-MCDA idéale? Fusion au niveau de l'évaluation des critères, analyse multicritères hiérarchique pour la formalisation du problème et sur-classement pour la décision

Décider "dans le certain" sur le risque est une première étape

L'incertitude sur les différentes conséquences des décisions n'est pas prise en compte. Un modèle de décision en univers risqué associe un acte à des conséquences probabilisées dépendant des différents états de la nature. Dans cette approche, on introduit la prise en compte de l'incertitude dans l'évaluation d'un niveau de risque au travers de différents scénarios considérés comme des critères. Ces critères sont évalués en terme d'importance dans la détermination : est-ce que l'existence de tel scénario aggravé (de plus en plus grave) est important dans la détermination du niveau de risque ? En d'autres termes, est-ce qu'il influence fortement la décision ? Cette analyse ne traduit pas la croyance dans le fait que le scénario se réalise. Un scénario envisagé est seulement susceptible de se réaliser. Aucune mesure ne permet de caractériser la croyance dans la réalisation du scénario : on est dans un cadre de décision "dans le certain". Ceci est évidemment critiquable et il apparaît nécessaire d'étudier la perspective de décision dans l'incertain.

Perspective : remplacer l'importance par une estimation de la confiance ou croyance Cette approche suppose à la base la proposition d'une structure hiérarchique explicitant des scénarios de risque. Les poids, interprétés jusqu'à présent en terme d'importance ou de préférences au stade final de la fusion peuvent alors être considérés en terme de masses de croyance relatives à la réalisation effective du scénario considéré. De la sorte, on évolue vers un cadre de décision dans l'incertain basé non pas sur une mesure de probabilités mais sur des masses de croyance. L'utilisation de fonctions de croyance peut en effet remplacer des probabilités dans le cadre de l'analyse de décision dans l'incertain (Yager, 2008)). Dans ce cadre, les opérateurs *OWA* (Ordered Weighted Averaging) permettent de mettre en place un cadre exploitant la théorie des fonctions de croyance et la décision dans un contexte d'incertitude et d'ignorance (Yager, 2008). Le cadre hiérarchique retenu est a priori tout à fait compatible avec l'utilisation des opérateurs *OWA*. Le travail effectué d'un point de vue méthodologique pour structurer le problème peut être une base utile pour développer cette nouvelle approche.

Valider la méthode

Quelle est la décision de "référence" ? La méthode reste délicate à valider. En effet, la validation des méthodes d'aide à la décision ou de fusion d'information, considérées isolément les unes par rapport aux autres, constitue déjà un problème connu. Comment peut-on valider un processus de fusion ? Quelle est la signification de la validation ? Est-ce que la méthode permet de prendre la meilleure décision, sachant que cette meilleure décision n'est pas connue, difficile à identifier et que le rôle de la méthode est justement d'aider à y voir plus clair ? La méthodologie *ER-MCDA* proposée associe les deux méthodes et duplique donc cette difficulté de validation.

Il est établi qu'un modèle de structuration hiérarchique n'est qu'une façon pour un observateur de représenter la réalité. La structuration relève plus d'un art que d'une science rendant ici la validation difficile. Les études de terrain constituent un moyen d'imaginer une validation : la validation avec une observation de terrain ne garantit pas la qualité de la décision. Pour assurer la logique et la complétude de la structure hiérarchique, une validation par groupe est conseillée (Saaty and Shih, 2009). Dans des cas de décision simples, on peut imaginer analyser a posteriori des choix qui ont été faits dans le passé. En supposant que les décisions aient été les bonnes, il s'agit alors de voir si le système identifie les décisions effectivement prises. La valeur intrinsèque d'une décision reste cependant délicate à déterminer. Cette difficulté motive les développements et la recherche dans les domaines de l'aide à la décision et de la fusion d'information. Certains domaines tels que le domaine industriel ou ceux traitant d'équipements technologiques peuvent exploiter plus que d'autres les apports des approches de retour d'expérience et d'analyse de situations de décision existantes.

Le domaine des risques naturels introduit une difficulté supplémentaire liée à la fréquence et à la méconnaissance des phénomènes : une mesure de prévention, par exemple un plan de prévention des risques, sera paradoxalement considérée comme la bonne décision tant qu'il n'y aura pas eu d'événements remettant en cause les hypothèses et les choix faits. La validation des évaluations du risque est ainsi particulièrement difficile car il faudrait une durée infinie pour vérifier que les probabilités associées à une conséquence avaient été correctement évaluées (Renn and Graham, 2006)

Dans ce contexte, les approches d'aide à la décision tels que le dispositif *Sites Sensibles Avalanches* utilisé comme exemple (voir 7, p. 140), constitue un moyen d'identification a priori des zones susceptibles d'être affectées.

Perspective : définir un protocole de validation . . . à dire d'experts Dans le cadre des approches d'aide multicritères à la décision correspondant à une problématique de rangement, la validation nécessite d'avoir défini explicitement les cas limites permettant de différencier les différentes catégories. Cette étape de définition explicite est indispensable pour vérifier a posteriori que les alternatives testées correspondent aux hypothèses initiales.

Dans le cadre du processus de fusion, la démarche de validation doit porter sur la modélisation du problème, les données d'entrée, le processus et les résultats de fusion (Bloch and al., 2001).

Nous ne voyons pas d'autres moyens que de procéder de manière indirecte en analysant les moyens et la forme : comment la décision a-t-elle été prise ? est-elle argumentée ? quels sont les éléments factuels ? quelle est la part d'interprétation ? quel est le niveau d'incertitude associé aux choix ? Cette approche, de bon sens, correspond à celle mise en œuvre, dans le cadre des analyses faites par des magistrats ayant à juger des expertises dans des cas où malheureusement la catastrophe n'a pu être évitée (Tacnet et al., 2008). L'approche proposée répond à ces objectifs mais ne constitue évidemment pas une solution, ni une méthodologie "presse-bouton" permettant de définir la meilleure solution de manière indiscutable.

La piste envisagée ne peut donc, à notre avis, qu'être constituée par la mise en place de procédures "qualité" s'intéressant non pas seulement à la forme mais aussi au fond et au contenu des expertises. Dans ce cadre, les méthodes utilisées, la diversité des avis et des approches, la description réaliste et objective des limites des outils et données utilisées sont des éléments devant être décrits.

Nécessité de prototypes applicatifs

Des environnements de calcul indispensables La mise en œuvre de la méthode n'aurait pas été possible sans le recours à des routines de calcul permettant les calculs de fusion. Ces outils restent encore peu nombreux et d'une utilisation assez lourde. L'amélioration et l'interfaçage de ces environnements de calcul est certainement une étape indispensable pour promouvoir l'utilisation de la théorie de *Dezert-Smarandache (DSmT)*. L'outil support de la méthodologie *ER-MCDA* ne reste qu'un prototype perfectible.

Perspective : développer des routines génériques pour décrire les structures hiérarchiques, améliorer l'interfaçage avec le calcul et les décideurs Disposer de routines de calcul permettant la fusion est assurément indispensable pour conduire ce genre de travail d'intégration. Néanmoins, en l'état actuel, il nous semble qu'il faudra encore améliorer et soigner l'interfaçage de ces routines pour faciliter leur intégration dans d'autres applications. Pour communiquer sur et analyser les résultats, les aspects graphiques nous apparaissent essentiels dans le cadre d'applications dédiées à l'aide à la décision. L'objectif serait, par exemple, de disposer d'un tableau de bord de la décision comparant les résultats des méthodes, leur sensibilité et pouvant être discuté avec un décideur.

10.3 Aspects opérationnels

D'un point de vue opérationnel, la discussion porte dans un premier temps sur les apports opérationnels (FIG. 10.2) puis sur une analyse critique vis-à-vis des différents objectifs initiaux :

- la méthodologie permet-elle d'améliorer la formalisation et la qualité de l'expertise ?
- en quoi permet-elle d'explicitier et prendre en compte les différents types d'incertitude mobilisés au cours du processus d'expertise ?
- comment cette méthodologie peut-elle améliorer l'analyse des risques naturels et permet-elle une décision ?
- en quoi peut-elle contribuer à une meilleure appropriation des résultats de l'expertise par les populations et les décideurs ?

Dans un second temps, la discussion porte sur le caractère opérationnel et la mise en œuvre de la méthodologie :

- le développement et la mise en œuvre des outils ;
- les conditions d'utilisation possible des méthodes ;

10.3.1 Les apports

Apport dans le cadre de la gestion des risques naturels

L'ingénierie des connaissances au service d'une amélioration de l'expertise De manière courante, toute amélioration de la connaissance, proposition d'outils, expertise mise en œuvre dans le cadre de la gestion des risques naturels, est assimilée à une forme d'aide à la décision. Dans le même temps, tout le monde partage le sentiment plus ou moins clair que la qualité des informations va jouer un rôle dans la décision, que les modèles ne sont que des simplifications de la réalité souvent complexe mais aussi... qu'il demeure encore beaucoup d'incertitude. L'analyse aborde les champs disciplinaires de l'aide à la décision, des théories de l'incertain et le domaine thématique des risques naturels soutenus par tout un corpus de connaissances et disciplines issues des sciences physiques. Le dénominateur commun reste l'information de sa production à son utilisation dans le cadre du processus d'expertise. Au final, il s'agit d'une démarche d'*ingénierie des connaissances consistant à fournir la bonne information à la bonne personne au bon moment pour qu'elle puisse prendre la bonne décision* (Barthes, 2002). L'approche proposée repose sur une approche intégrée allant de l'acquisition et de la caractérisation de l'imperfection de l'information à l'exploitation dans le cadre d'outils d'aide à la décision.

Un nouveau paradigme pour l'expertise nécessitant et profitant d'une co-construction de la décision : la méthodologie développée reprend les principes de l'aide multicritères à la décision qui repose sur la co-construction du modèle de décision entre l'analyste et le/les décideur(s). Cette attitude est ici un apport important pour permettre d'inscrire l'analyse du risque dans un cadre de gestion intégrée.

Dans leur pratique courante, les experts thématiques des phénomènes naturels (crues torrentielles, avalanches...) définissent leur contribution à la décision par la fourniture d'éléments d'analyse des conditions d'occurrence, de propagation et d'interaction avec les enjeux. L'expert tente de décrire l'éventail des solutions possibles notamment dans des contextes où l'incertitude est forte. C'est notamment le cas de phénomènes dont l'occurrence est rare, pour lesquels il n'existe que peu de données historiques. Cette contribution technique n'est donc pas en soit une véritable aide à la décision dans le sens où elle n'est pas co-construite avec celui qui va exploiter les résultats.

Dans la réalité, d'autres facteurs économiques, sociaux, environnementaux vont intervenir et conduire à des décisions différentes des seules préconisations d'ordre techniques. Certaines décisions réelles, ne correspondant pas à des "optimisations", ne paraîtront pas rationnelles. La

rationalité limitée ou personnelle a largement été analysée par les théoriciens de la décision. Les acteurs de la gestion des risques n'y échappent pas.

D'un autre côté, le décideur n'a, en effet, pas obligatoirement le même système de valeurs et de jugement (modèle de décision) que celui de l'expert. Il n'a pas non plus forcément besoin de mobiliser l'ensemble des connaissances techniques disponibles pour décider. Cette situation réelle peut s'avérer assez déstabilisante pour les experts : elle pose la question du caractère très relatif de la bonne ou meilleure décision. Quelle qu'en soit la cause, le constat est finalement que "*son aide à la décision*" n'est pas celle du décideur réel.

Il faut donc rester lucide sur la contribution réelle de l'expertise sur les risques naturels dans le processus global de gestion. L'analyse précédente s'applique aussi à ce travail. Nous avons considéré qu'une première contribution de l'expert à la décision se situe principalement dans sa capacité à expliciter son raisonnement et à décrire ses sources et niveaux d'incertitude.

Dans cet esprit, les méthodes d'aide multicritères à la décision associées aux "nouvelles" théories formelles de l'incertain nous apparaissent comme des supports conceptuels et méthodologiques intéressants pour structurer les raisonnements et permettre une présentation alternative de l'analyse des risques.

Un affichage complémentaire de l'incertitude : la vision classique du risque basée sur une décomposition entre des termes caractérisant l'*aléa* et la *vulnérabilité* (voir FIG. 2.9, p. 29) ne prend classiquement en compte que la composante aléatoire de l'incertitude associée à l'occurrence des phénomènes exprimée au travers de probabilités et de période de retour. Certaines situations de risque sont envisageables sans que les probabilités "objectives" puissent être définies, soit parce que le phénomène ne s'est jamais produit, soit parce que les données historiques font défaut. Dans ce cadre, des approches qualitatives basées sur des comparaisons de scénarios sont utilisées en pratique. Notre démarche reconnaît explicitement cette réalité et propose de prendre en compte les différents scénarios de phénomène et d'en décrire la nature.

Par rapport aux approches classiques de décision en univers risqué ou incertain, la démarche est donc différente. Le risque constitue ici l'objet d'étude au travers de ses différentes composantes : il s'agit d'une décision en environnement certain mais portant sur le risque. L'explicitation de l'incertitude concerne l'information utilisée pour analyser le risque et constitue en quelque sorte un facteur de décision. L'incertitude liée à l'analyse du risque (en tant qu'objet d'étude) est évaluée au travers de la structure du modèle hiérarchique sous forme de scénarios de réalisation du phénomène. Sur ces bases, les méthodologies proposées permettent la reconfiguration de modèles de décision hiérarchiques explicitant les scénarios possibles.

Apports pour l'expertise et l'analyse de risque

La valorisation et le diagnostic d'outils d'aide à la décision existants permet de rattacher ces méthodes à des cadres méthodologiques plus rigoureux en valorisant la connaissance experte et garantissant une plus grande polyvalence des résultats. Elle permet également de définir le cadre et les principes de nouvelles applications d'aide à la décision amenées à être développées dans le cadre de la gestion des risques naturels. Ces principes concernent le choix des méthodes mais aussi la démarche de co-construction des applications associant les analystes et les décideurs.

La reconnaissance et la valorisation de l'expertise qualitative ou naturaliste. Le développement des techniques de modélisation des phénomènes naturels d'avalanches et de crues torrentielles pour l'analyse des risques ne suffit pas pour définir des mesures de prévention opérationnelles. Le zonage des risques est un exemple frappant. Les techniques de modélisation

devraient logiquement voir leur utilisation croître mais sans remplacer le travail d'expertise réalisé sans eux. Le contraire équivaldrait à rejeter l'ensemble des mesures définies sans (ou presque sans) calculs pour établir par exemple les P.P.R. Un jugement de valeur insidieux tend parfois à s'installer entre des approches "modernes" et l'expertise plus qualitative. Dans le même temps, les approches de modélisation sont parfois basées sur des estimations très subjectives des données. Notre approche apporte ici un cadre méthodologique et un moyen de décrire explicitement les hypothèses faites quant à l'estimation des données, la confiance dans l'évaluation faite et les éventuelles contradictions existant entre les sources d'information. Il n'y a donc pas une seule démarche d'expertise mais plusieurs approches qu'il faut combiner pour fournir une véritable aide à la décision.

L'amélioration de la traçabilité et la contribution à la qualité globale de l'expertise. Du point de vue de l'expertise, la méthodologie fournit un cadre de formalisation des concepts de raisonnement mobilisés par l'expert en explicitant d'une part les imperfections dans l'analyse de l'information et, d'autre part, le caractère contradictoire des sources exprimant un avis. Le cadre formel de l'aide multicritères à la décision permet de prendre en compte la réalité et la complexité des critères analysés concrètement par les experts.

L'explicitation des raisonnements repose à la base sur leur modélisation conceptuelle. Plusieurs cadres ont été analysés pour tenter de représenter les éléments du raisonnement sous forme statique (les concepts et leur relations) ou dynamique (l'enchaînement temporel dans le cadre du raisonnement). Les méthodes de modélisation (*UML*, diagramme de cause-effet, pseudo-ontologies ...) présentent un cadre de représentation et de structuration des problèmes de décision en amont de l'approche *ER-MCDA*. Quels que soient les standards utilisés, les modèles conceptuels restent des outils difficiles à comprendre pour ceux qui ne sont pas familiers avec ces standards et/ou qui n'ont pas participé à leur création. Leur portée en tant qu'outil de communication est faible. Chaque contexte décisionnel et cible de diffusion nécessitera une adaptation des méthodes et un travail de "traduction".

L'approche *ER-MCDA* constitue un outil de capitalisation et d'explicitation des raisonnements des experts : il exprime des importances entre critères et connecte des grandeurs numériques avec des classes d'évaluation. Les modèles de transposition des critères quantitatifs et qualitatifs sont, en effet, des outils de calcul mais aussi des moyens d'explicitation des raisonnements et hypothèses des experts. Ils formalisent la correspondance entre une grandeur numérique ou l'appartenance à une classe descriptive de la décision. Dans notre modèle, l'évaluateur analyse directement une grandeur numérique (une pente, une largeur de fissure) au lieu d'attribuer une note. Ses observations réelles sont conservées dans le modèle et restent accessibles. Rien n'empêche par la suite d'appliquer différents modèles de transposition correspondant à d'autres interprétations du modèle. La conception des modèles d'évaluation et de transposition est indépendante du processus de fusion. Elle constitue un moyen appréciable pour décrire les hypothèses et les avis des experts pour l'évaluation du problème de décision en établissant un lien entre des classes d'évaluation quantitatives ou qualitatives au niveau des critères et les classes d'évaluation du critère de décision.

10.3.2 Les perspectives opérationnelles

Les perspectives opérationnelles (FIG. 10.9) sont les suivantes :

Etendre la démarche à d'autres risques naturels et phases d'expertise. La démarche actuelle repose sur une série d'exemples pris dans le domaine de l'expertise des risques naturels et concerne en majorité les avalanches de neige. Les exemples considérés restent évidemment des simplifications d'approches réelles d'analyse de risque dans le domaine des risques

naturels en montagne. Dans son esprit, la démarche est, sur le fond tout à fait générique, et peut évidemment s'appliquer à d'autres risques naturels et phases d'expertise. Dans ce cadre, un travail, non détaillé ici, est engagé pour décrire et formaliser les composantes du raisonnement d'expertise dans le cadre du risque torrentiel (voir B.4, p. 337). En marge de cette première application, les perspectives sont notamment de décomposer l'expertise globale d'un phénomène sous la forme de systèmes d'analyse et d'aide à la décision thématiques (production de versant, efficacité des ouvrages ...).

Développer une démarche d'approche intégrée de l'incertitude. Les développements réalisés dans le cadre de ce travail portent actuellement essentiellement sur la prise en compte de sources "humaines" exprimant un avis qualitatif ou choisissant des valeurs de confiance associées à des intervalles numériques. L'imperfection liée à la méconnaissance des lois régissant les processus physiques (élémentaires ou globaux) ne doit pas être oubliée. D'autres sources telles que les bases de données, les modèles numériques produisent des informations qui sont ensuite exploitées dans le cadre de l'analyse. La caractérisation de l'incertitude associée à ces deux types de sources constitue deux axes de développement essentiel. D'un côté, la qualité intrinsèque des données stockées dans les systèmes d'information (tels que les bases de données avalanches⁵) doit être évaluée par des systèmes spécifiques. De l'autre, les modèles nous semblent devoir faire l'objet d'analyses de sensibilité complète (Saltelli et al., 2004) et prendre en compte les imperfections des données d'entrée dans le cadre d'approches hybrides (Chojnacki, 2005). Il manque encore à ce jour une véritable approche intégrée de l'imperfection de l'information dans le cadre de l'expertise exploitant les différents types de sources et d'informations qualitatives et quantitatives.

Analyser la perception de l'incertitude dans le contexte de la gestion des risques. Expliciter la nature et les sources d'incertitude permet de mieux décrire un processus de raisonnement mais peut-on être vraiment certain que cet affichage est attendu, utile pour les décideurs, la population ? D'un côté, on peut imaginer qu'il permettra une prise de conscience quant à la nécessité d'avoir une approche prudente de la gestion des risques. D'un autre côté, cette incertitude peut faire peser une trop grande responsabilité sur les décideurs ou discréditer les experts qui afficheraient trop d'incertitude ... Pour répondre à ces questions, une démarche de recherche en sciences humaines et sociales est indispensable : comment analyser la perception de travaux sur la décision et l'incertitude ? Est-ce utile, contre-productif, possible, illusoire ? Est-ce que l'on peut vraiment parler de bonne décision a priori dans ce contexte ? Des projets ont été imaginés dans ce sens mais sans être réalisés à ce jour (Tacnet et Richard, 2006)(FIG. 10.8).

5. www.avalanches.fr

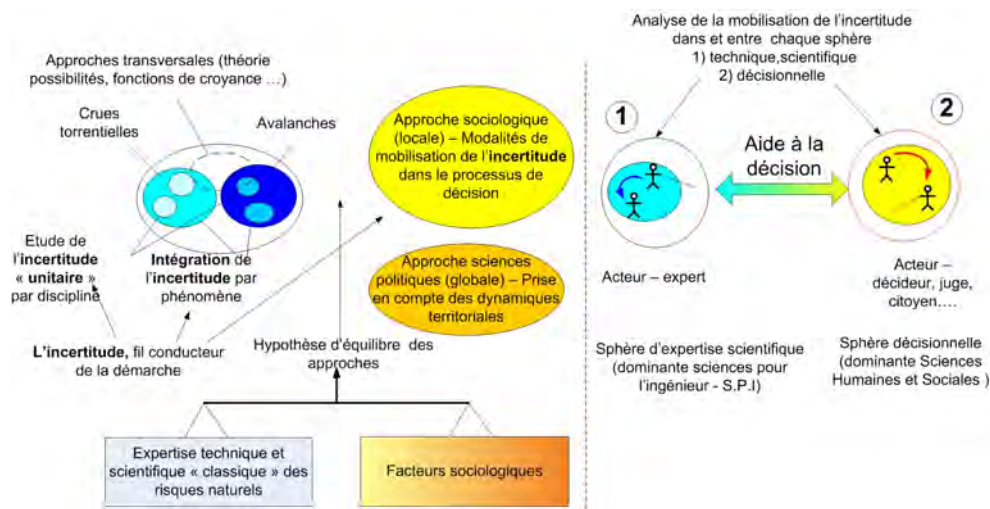


FIGURE 10.8 – Projet d’analyse de la perception de l’incertitude dans le processus de gestion des risques

Considérer la dimension spatiale et géographique des risques et de la vulnérabilité Dans la plupart des approches d’analyse de risque, seule la vulnérabilité directe (structurale, humaine) est prise en compte (sous une forme imparfaite). Les aspects spatiaux ne sont ici considérés qu’en tant que supports de représentation et de localisation des éléments d’analyse du risque. Dans ce cadre, les bases d’une méthodologie permettant de spatialiser l’approche *ER-MCDA* sont proposées dans le contexte d’une application au zonage des risques (voir 9.2, p. 252). Le développement et la mise en œuvre de la méthode dans ce contexte est d’un grand intérêt pour arriver à déterminer, en un point donné, non seulement le niveau de risque estimé mais aussi une évaluation de la confiance dans l’estimation. A titre de perspective ultérieure, d’autres formes de vulnérabilités indirectes ou liées notamment à la “géographie des risques” (November, 2006) pourront être intégrées dans un futur modèle de décision.

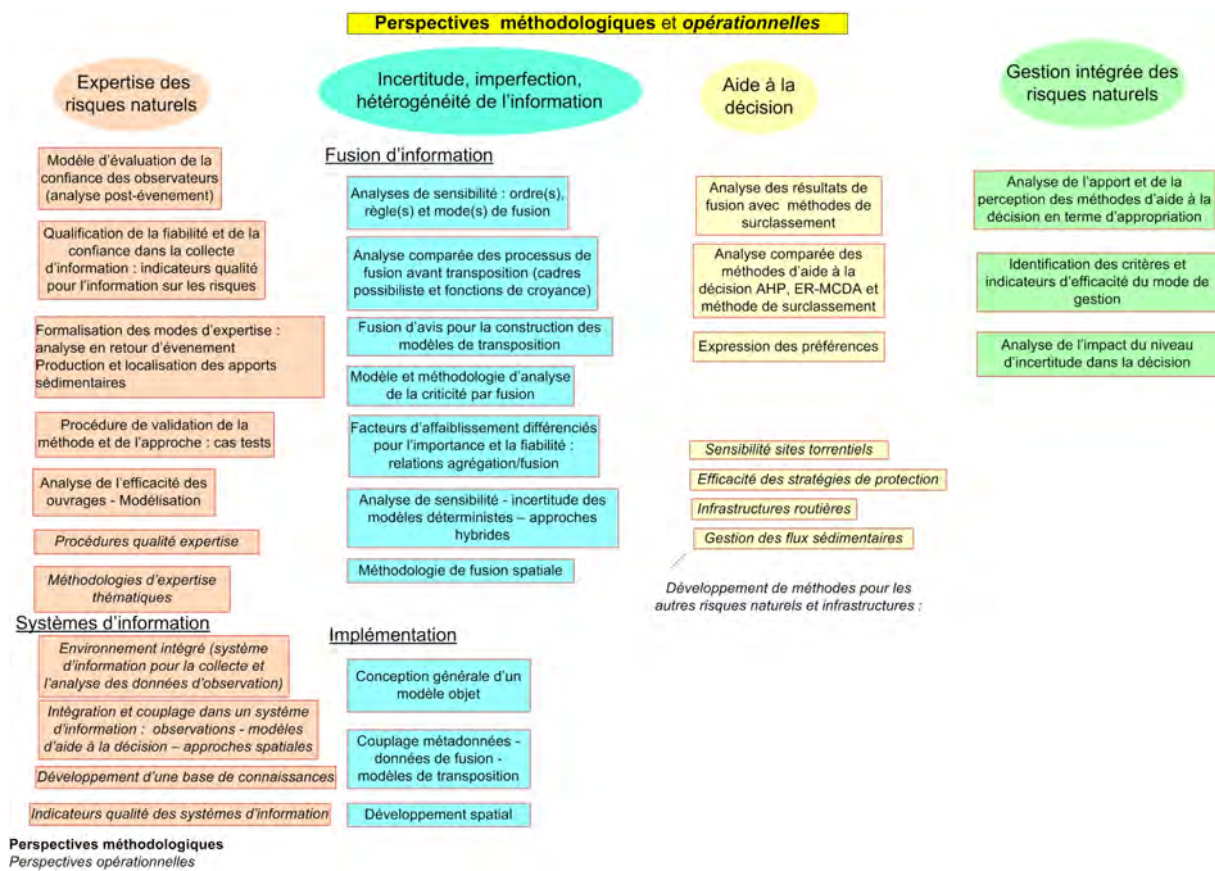


FIGURE 10.9 – Perspectives méthodologiques et opérationnelles de la thèse

Chapitre 11

Conclusion

11.1 Cadre général

11.1.1 La problématique

Les phénomènes gravitaires rapides en montagne, tels que les avalanches et les crues torrentielles, conservent encore aujourd'hui leur part de mystère et d'inconnu. Leur occurrence reste aléatoire et l'amélioration de la connaissance des phénomènes ne permet ni d'expliquer, ni de prévoir avec certitude leur réalisation, leurs caractéristiques et leurs effets. Le domaine de la gestion des risques naturels est donc finalement comme la connaissance : " *... une navigation dans un océan d'incertitudes au travers d'archipels de certitudes* " (Morin, 1999). Vouloir "prendre en compte l'incertitude" peut donc sembler assez vain et présomptueux. Au moment de conclure, le titre de ce travail apparaît finalement discutable. Au sens commun, l'incertitude est effectivement un concept générique, facilement et rapidement compréhensible. En pratique, il est nécessaire d'en préciser le sens et les contours. Dans le cadre de ce travail, l'incertitude est ainsi envisagée comme une des formes d'imperfection de l'information principalement sous sa forme épistémique, c'est à dire liée à la connaissance par opposition à l'incertitude aléatoire liée à la variabilité des phénomènes.

Dans un contexte d'information imparfaite, l'expertise mobilise de manière duale des méthodes qualitatives et/ou quantitatives et repose sur l'exploitation d'informations hétérogènes, souvent incertaines et imprécises voire conflictuelles provenant de sources plus ou moins fiables. Cette expertise apparaît comme un processus décisionnel composite dont les cheminements et hypothèses ne sont pas toujours clairement explicités. La traçabilité des raisonnements répond pourtant à une double exigence : une exigence normative associée à la description et l'amélioration de la qualité intrinsèque de l'expertise mais aussi de besoins exprimés par la société en vue d'une meilleure compréhension et appropriation de ses résultats.

La problématique concerne la relation entre l'information imparfaite (incertaine, imprécise, conflictuelle) et la décision dans le contexte de l'expertise des risques naturels. Les quatre objectifs du travail sont les suivants :

- la description et la capitalisation de l'information pour la décision avec une perspective différée d'intégration dans des systèmes d'information ;
- l'analyse et la proposition de méthodologies d'aide à la décision adaptées au contexte de l'analyse des risques naturels ;
- la représentation et le traitement des imperfections de l'information associée à l'expertise ;
- la prise en compte et l'explicitation de l'imperfection de l'information dans le cadre d'une décision.

Sur ces bases, cette thèse envisage l'expertise sous l'angle d'un processus d'aide à la décision basée sur des informations imparfaites provenant de sources de fiabilité variable. L'aide multi-

critères à la décision et la fusion d'information sont analysées séparément puis conjointement pour proposer une méthodologie mixte.

11.1.2 La démarche

La gestion des risques naturels en montagne utilise des résultats d'expertise mobilisée pour identifier, caractériser les phénomènes puis participer à la définition et au choix de stratégies de prévention. Trois étapes sont mises en œuvre pour répondre à la problématique et atteindre les objectifs.

Décrire le cadre global de l'expertise dans le domaine des risques naturels en montagne puis identifier la problématique constitue la première étape. Les objectifs de l'expertise concernent principalement la caractérisation des composantes du risque, son évaluation et la définition des mesures et stratégies de prévention. La mise en œuvre s'appuie sur une connaissance partielle des phénomènes physiques et des informations souvent incertaines, imprécises et parfois conflictuelles. Dans le cadre de cette analyse, la traçabilité des éléments du raisonnement d'expertise est identifiée comme un facteur de qualité nécessaire, attendu par les utilisateurs et la société mais perfectible. Décrire et expliciter l'incertitude, au sens général du terme, fait partie de la démarche scientifique et conditionne les démarches de gestion des risques. Enfin, les liens entre l'expertise, ses produits et les utilisateurs ou la société en général sont remis en question. L'expertise repose essentiellement sur une vision technique, réaliste et endogène des risques naturels qui ne participe pas à appropriation de ses résultats et à l'intégration des approches de gestion des risques. Sur ces bases, la démarche envisage l'expertise sous l'angle d'un processus d'aide à la décision basé sur des informations imparfaites dont il s'agit de caractériser la nature et de mesurer l'influence sur les décisions prises. La question posée est alors de savoir quelle méthode utiliser pour décrire les composants d'un raisonnement puis évaluer l'imperfection et son impact sur la décision.

L'analyse des méthodes existantes suit un fil directeur constitué par le lien entre la décision et l'information. Cette seconde étape aborde successivement les modes de capitalisation de l'information dans le domaine de l'ingénierie des connaissances, puis les cadres et méthodes d'aide à la décision avant finalement d'analyser les cadres théoriques permettant la représentation et le traitement de l'information imparfaite.

Deux axes de développements sont identifiés puis traités dans la troisième étape. Le premier concerne le diagnostic, la structuration et la reconfiguration hiérarchiques de modèles d'aide à la décision existants. Le second porte sur l'association de méthodes d'aide multicritères à la décision et de fusion d'information pour prendre en compte l'imperfection de l'information dans le processus de décision que constitue l'expertise.

11.1.3 L'analyse des méthodes existantes

La décision et l'information sont étroitement liées. Pour expliciter les concepts et les processus de raisonnement puis capitaliser la connaissance dans la perspective d'une intégration dans des systèmes d'information, les méthodes de modélisation conceptuelle issues des domaines de l'informatique, de la sûreté de fonctionnement et des méthodes de planification permettent d'établir des visions statiques et dynamiques pour formuler le problème de décision en vue de sa structuration. Cette formalisation sert donc à la fois l'objectif de capitalisation, de traçabilité et constitue le fondement de la structuration du problème de décision. Les systèmes experts qui produisent de nouvelles informations à partir d'information d'entrée ne sont pas retenus. Les

métadonnées associées aux informations constituent une forme naturelle pour décrire la qualité et la généalogie des informations. Il manque par contre un moyen de mesurer la qualité de l'information pouvant jouer aussi un rôle d'indicateur dans le cadre d'une approche qualité globale. Les typologies décrivant l'imperfection de l'information sont nombreuses. Elles distinguent essentiellement l'incertitude aléatoire ou épistémique, l'imprécision, l'incomplétude et l'incohérence. Caractériser l'imperfection de l'information, dont l'incertitude n'est qu'une forme parmi d'autres telle que l'imprécision ou l'incomplétude, est déterminant dans l'optique d'une aide à la décision. Il faut par contre pouvoir représenter, mesurer et traiter cette imperfection.

L'analyse du processus de décision et des méthodes d'aide à la décision positionne les approches mono et multicritères dans des cadres de décision en univers certain, risqué ou incertain. Pour aider à la décision, la théorie classique de la décision rationnelle repose sur un modèle de maximisation d'une utilité espérée. Ce modèle de décision ne représente cependant pas la réalité du comportement humain soumis à de nombreux biais cognitifs. Cette rationalité s'avère finalement limitée et soumise à une grande subjectivité. Ceci amène d'une part à relativiser les approches basées sur une optimisation monocritère et, d'autre part, à considérer avec prudence la démarche d'expertise. La thématique d'aide à la décision dans le domaine des risques est source d'ambiguïté. Une décision dans le contexte des risques peut être prise dans un cadre risqué, incertain ou certain : il faut distinguer l'objet de la décision et la façon dont la décision est envisagée.

Les méthodes d'aide multicritères à la décision proposent une alternative au principe de l'optimisation mono-critère pour choisir, ranger, classer, trier des alternatives ou des actions en vue d'une décision sur la base d'éléments d'appréciation multiples, antinomiques. Ces méthodes respectent mieux le processus réel de construction d'une décision dans leur principe et dans leur mise en œuvre. Les méthodes d'agrégation partielle dites de sur-classement acceptent l'intransitivité des préférences et l'incomparabilité entre alternatives. Les méthodes d'agrégation totale et l'approche hiérarchique multi-critère (*AHP*) en particulier offrent à la fois un cadre et une méthode analytique pour formuler un problème de décision et expliciter des préférences subjectives entre les critères. Les méthodes d'agrégation ne permettent cependant pas de représenter toutes les structures de préférences et leur pertinence dans le cadre de l'analyse des risques naturels doit être discutée. C'est notamment le cas pour des combinaisons qualitatives de composantes du risque (aléa, vulnérabilité ...) assimilables à des critères dans une approche multicritères qui n'est pas clairement exhibée. Les questions de la pertinence et du diagnostic d'outils d'aide à la décision existants sont posées : les combinaisons de critères utilisées pour évaluer les risques s'apparentent à des combinaisons de facteurs mais les méthodes d'aide multicritères à la décision permettent-elles vraiment d'aider à la décision pour par exemple évaluer un niveau ou une sensibilité au risque ?

Pour exploiter l'information imparfaite, les nouvelles théories de l'incertain élargissent le cadre classique des probabilités. Les théories des ensembles flous, des possibilités et des fonctions de croyance, au travers des théories de *Dempster-Shafer*(*DST*) et *Dezert-Smarandache*(*DSmT*), constituent des cadres alternatifs particulièrement adaptés pour décrire les informations vagues, incertaines et imprécises manipulées et évaluées dans le cadre de l'expertise des risques naturels. La fusion d'information permet d'exprimer et prendre en compte des niveaux de vérité variables associés à des évaluations provenant de nombreuses sources de fiabilité variables et conflictuelles sous réserve du choix d'un cadre théorique et de règles de fusion adaptées. Elle nécessite par contre de choisir un cadre de discernement commun pour fusionner les informations.

Deux enjeux de développement émergent pour répondre à la problématique et aux objectifs. Le premier enjeu concerne le diagnostic, la restructuration de modèles de décision existants et l'analyse de la pertinence des méthodes d'aide multicritères à la décision dans le cadre de l'expertise. Le second enjeu porte sur la représentation, le traitement et la prise en compte de l'imperfection de l'information évaluée dans les décisions au travers des méthodes d'aide multicritères. Les méthodes et théories d'aide à la décision, de représentation et de traitement de l'information incertaine apportent en effet isolément des réponses partielles aux objectifs de recherche :

- Les méthodes d'aide multicritères à la décision permettent de décrire un processus de décision en agrégeant des évaluations de critères hétérogènes plus ou moins importants. Dans leurs versions originales, elles ne permettent pas de prendre en compte des évaluations multiples, conflictuelles de critères exprimés de façon incertaine. Les méthodes d'agrégation totale additive transforment des critères initiaux dans une même échelle pour autoriser la somme ;
- Les théories formelles de l'incertain représentent l'information vague, imprécise, incertaine et permettent la combinaison des niveaux de vérité associés aux informations provenant de sources hétérogènes de fiabilité variables et potentiellement conflictuelles. Les théories des fonctions de croyance et des possibilités ne peuvent fusionner que des informations de même nature provenant de sources différentes et pas des critères hétérogènes.

Des méthodologies sont donc requises pour :

- analyser la pertinence des outils et méthodes d'aide à la décision existants dans le contexte de l'expertise des risques naturels et capitaliser, valoriser la connaissance experte introduite dans ces outils ;
- représenter un processus de décision (tel que l'expertise), basé sur des critères multiples qui sont évalués de manière imprécise, incertaine par des sources hétérogènes, de fiabilité variable et potentiellement conflictuelles, en utilisant conjointement les méthodes d'analyse multicritères et la fusion d'information ;
- aider à la décision en fournissant une évaluation d'actions ou d'alternatives intégrant l'imperfection et l'incertitude de l'information de base.

11.1.4 Les développements

Diagnostic, structuration et reconfiguration de modèles de décision

L'expertise des risques naturels s'appuie souvent sur des méthodes empiriques d'agrégation d'inspiration multicritères. Elles sont, par exemple, utilisées pour évaluer un risque par combinaison de ses différentes composantes ou pour classer, choisir des sites en fonction de leur niveau de sensibilité et s'appliquent souvent à l'évaluation non simultanée d'un très grand nombre de sites ou d'actions. Ces méthodes intègrent un véritable savoir-faire et une connaissance experte qui s'expriment notamment au travers de l'identification des critères et des classes d'évaluation. Dans le même temps, les méthodes d'agrégation sous-jacentes ne sont pas toujours pertinentes pour représenter les préférences des décideurs et font l'objet d'un diagnostic. Les méthodes d'agrégation basées sur l'utilité additive peuvent ne pas être adaptées avec le modèle de préférences retenu pour l'analyse des risques : les formes multiplicatives ou mixtes doivent être privilégiées.

Sur la base d'exemples, une approche de diagnostic, de structuration et de reconfiguration de méthodes existantes est proposée en exploitant l'analyse multicritères hiérarchique (*AHP*). Trois objectifs sont étudiés :

- transformer un modèle (il en existe de nombreux) se présentant sous la forme d'une série de critères dotés de fonctions d'utilité empiriques en une hiérarchie structurée capable

d'évaluer les alternatives individuellement. Ceci constitue l'enjeu de la *structuration de modèle hiérarchique* ;

- expliciter les préférences à partir des fonctions d'utilité empiriques (ou poids absolus, scores) existants. C'est l'enjeu des *méthodes de normalisation* définissant les poids relatifs de chaque critère ;
- reformuler le problème de décision pour l'analyser sous un angle nouveau, valider le modèle de préférences ou le modifier. C'est l'enjeu de la *reconfiguration hiérarchique*

La méthodologie de diagnostic et de reconfiguration emploie des méthodes de normalisation particulières et repose sur une décomposition analytique hiérarchique explicitant les principes de structuration et de choix de préférences retenus dans des systèmes existants. La reconfiguration transforme une série de critères caractérisés par des préférences globales sous une forme hiérarchique puis modifie la structure pour utiliser ces critères dans une autre formulation mettant par exemple en évidence des scénarios de phénomènes. La reconfiguration hiérarchique autorise donc des visions alternatives d'un même problème, améliorant du même coup la traçabilité du raisonnement et des préférences. Elle permet une capitalisation de la connaissance experte et aussi une polyvalence ou inter-opérabilité entre différentes formulations d'une même réalité. Ces méthodologies permettent ainsi d'envisager la valorisation de données d'évaluation des alternatives coûteuses à acquérir sur le terrain dans le cadre de dispositifs d'enquête d'ampleur nationale tels que le dispositif "Sites Sensibles Avalanches" utilisé comme exemple d'application. Enfin, cette méthodologie est, de plus, une étape amont indispensable de l'approche *ER-MCDA*, constituant le deuxième axe de développement de ce travail, en formulant le problème de décision et caractérisant l'importance des critères.

Associer l'aide multicritères à la décision et la fusion d'information

La théorie des probabilités constitue un cadre classique, historique et "ultime" pour gérer l'incertain dans le domaine de la gestion des risques naturels. Cette théorie montre cependant ses limites pour représenter les informations imprécises, vagues et conflictuelles qui correspondent bien souvent à ce dont les experts disposent pour décrire les composantes du risque. Les "nouvelles" théories de l'incertain permettent de représenter des informations pouvant être à la fois imprécises, incertaines, vagues et conflictuelles. La théorie des ensembles flous permet d'établir des correspondances entre des variables linguistiques et des grandeurs numériques ou qualitatives. La théorie des possibilités propose une représentation de l'incertitude et de l'imprécision. La théorie des fonctions de croyance, notamment au travers de la théorie de *Dezert-Smarandache*, constitue un cadre général pour décrire et fusionner l'information imprécise, incertaine et conflictuelle. Ces trois cadres sont utilisés dans le cadre de la démarche mise en œuvre. Les approches d'aide multicritères à la décision permettent la combinaison de critères multiples en prenant en compte les préférences, l'importance relative des critères. Les théories de l'incertain permettent de manipuler l'information imparfaite. La question de l'utilisation conjointe de ces approches est donc posée.

La méthodologie *ER-MCDA* associe donc l'analyse multicritères hiérarchique et la fusion d'information dans le cadre d'une décision en univers certain. La théorie des fonctions de croyance est utilisée dans le cadre classique de la théorie de *Dempster-Shafer* (*DST*) mais aussi de la théorie de *Dezert-Smarandache* (*DSmT*). L'analyse hiérarchique constitue un support conceptuel pour formuler le problème de décision et définir des mesures d'importance des critères. Cette approche exploite l'analogie dans les principes et fondements des méthodes multicritères d'agrégation totale et de fusion d'information : elles reposent sur un même référentiel global correspondant à un modèle de préférences global pour l'une et à un cadre de discernement commun pour l'autre. L'approche permet de dissocier les phases d'évaluations imprécises et incertaines des critères et le lien avec la décision correspondant à l'approche experte et la décision. La démarche re-

pose sur deux niveaux de fusion. Le premier concerne la fusion des évaluations imprécises après transposition. Le second fusionne les critères considérés comme des sources.

Des méthodes spécifiques sont ainsi développées pour connecter les approches et les cadres de raisonnement de la méthode d'analyse multicritères hiérarchiques et de la fusion d'information notamment pour :

- formuler le problème de décision puis expliciter les préférences ;
- définir les cadres de discernement de décision ;
- proposer des modèles de transposition quantitative et/ou qualitative, d'évaluation qualitative basés sur l'utilisation des théories des possibilités et des ensembles flous ;
- fusionner les jeux de masse de croyance en utilisant des facteurs d'affaiblissement et des pondérations pour prendre en compte à la fois l'*importance* et la *vérité* de l'information dans le processus de décision.

11.2 Les apports

Les apports et perspectives ont été décrits et analysés dans la discussion par rapport aux deux enjeux de développement de la thèse (chap. 10.1, p. 259). Ils sont rappelés sommairement ici en proposant une mise en correspondance avec les objectifs initiaux.

11.2.1 Introduire de nouvelles approches pour l'expertise des risques naturels

Deux cadres méthodologiques sont introduits dans le domaine de l'expertise des risques naturels en montagne. L'hypothèse visant à assimiler l'expertise à un processus de décision fait explicitement référence à l'aide à la décision dans le cadre de l'expertise. Les liens entre l'information et la décision conduisent ensuite à s'intéresser à la représentation et à la manipulation de l'information imparfaite. Cet angle de vision original aboutit finalement à associer ces deux contextes méthodologiques à l'expertise des risques naturels : l'aide multicritères à la décision et des théories de manipulation de l'information imparfaite que sont la théorie des ensembles flous, des possibilités et des fonctions de croyance au travers des théories de *Dempster-Shafer (DST)* et de *Dezert-Smarandache (DSmT)*. L'utilisation de ces théories s'avère être une alternative relativement nouvelle et prometteuse dans le domaine de la gestion des risques naturels.

De même, le rôle d'aide à la décision joué par l'expertise est souvent affirmé sans différencier les cadres de décision internes d'ordre technique associé au processus d'expertise et les cadres externes de décision qui débouchent sur l'utilisation des résultats dans la gestion des risques. Les méthodes d'aide multicritères à la décision ne sont que partiellement connues et utilisées. Leur analyse et utilisation dans le domaine de l'expertise permettent de rattacher certaines pratiques opérationnelles à des cadres méthodologiques plus reconnus tout en valorisant et explicitant la connaissance experte. L'aide multicritères à la décision complète les méthodes quantitatives d'évaluation des composantes du risque. Elle permet de représenter les éléments du raisonnement et de décrire leur importance au cours des phases du processus d'expertise. Ces méthodologies permettent, sous réserve de choisir les méthodes adaptées aux structures de préférences visées, la combinaison d'évaluations de composantes du risque évaluées de manière qualitative. Cette approche peut tout d'abord être mise en œuvre sur les volets techniques de l'expertise pour identifier, décrire, quantifier les phénomènes en choisissant, comparant des hypothèses ou des scénarios mais aussi dans un cadre décisionnel plus large de choix de stratégies associant les acteurs de la gestion du risque en prenant en compte d'autres critères.

Au final, l'approche hiérarchique multicritères propose, au travers de son approche analytique et synthétique, une méthode pour formuler de manière polyvalente le problème de décision en contribuant à la traçabilité du raisonnement. La fusion d'information permet quant à elle de caractériser la qualité d'une information évaluée de manière imparfaite provenant de sources

hétérogènes et potentiellement conflictuelles. Leur association offre un cadre de décision intégrant l'aspect multicritères et considérant l'imperfection de l'information. Pour chacun des deux enjeux, les apports sont brièvement rappelés ci-dessous.

11.2.2 Structurer, diagnostiquer, reconfigurer des modèles hiérarchiques

Apports méthodologiques

Un support méthodologique pour l'analyse de risque. La méthodologie proposée constitue un support méthodologique pour l'analyse de risque notamment dans les situations basées sur la combinaison et le croisement de critères impliquant des probabilités ne pouvant être que subjectives ou résultant d'évaluations imprécises et incertaines.

La discussion des méthodes multicritères. Les méthodes d'agrégation sont discutées et analysées dans le contexte de l'expertise des risques naturels. Elles ne permettent pas toutes de représenter les structure globales de préférences du décideur (soit la façon dont il va interpréter les évaluations, préférer une alternative à une autre). Les méthodes basées sur l'utilité additive doivent ainsi être considérées avec prudence, les méthodes multiplicatives ou mixtes doivent être privilégiées dans un contexte d'agrégation totale.

Normalisation et approche critère-estimateur-solution. Des méthodes de normalisation et d'agrégation spécifiques adaptées à une approche de type critère-estimateur-solution sont proposées. Ce type de modèle est mieux adapté à des systèmes existants portant sur des grands nombres d'alternatives car l'évaluation des alternatives peut être faite de manière disjointe. Les modes de normalisation spécifiques ont été développés pour prendre en compte les exclusivités entre critères et obtenir des résultats plus intuitifs et compatibles avec des structures hiérarchiques quelconques, parfois conçues sans respecter les principes de l'analyse multicritères hiérarchique originale (*AHP*).

Un support conceptuel pour la fusion. L'analyse hiérarchique est utilisée comme un support conceptuel permettant d'organiser les critères et définir leurs pondérations relatives. L'identification des critères constitue la base du modèle utilisé dans le cadre de la fusion d'information.

La structuration et la reconfiguration hiérarchiques. A partir d'une structure regroupant plusieurs critères sans hiérarchie à *plat*, la structuration puis la reconfiguration hiérarchiques permettent de regrouper les critères selon de nouveaux critères englobants et d'exprimer leurs poids relatifs en ayant recours à une méthode de normalisation adaptée. La reconfiguration hiérarchique permet donc de comparer des modes de classement de critères alternatifs et de vérifier la cohérence des préférences en exploitant une autre présentation. Dans le cadre de l'étude des risques naturels, cette possibilité concerne des représentations sous forme de scénarios correspondant à des situations plus ou moins aggravées. Cette méthodologie permet de représenter sous une forme alternative l'incertitude associée au phénomène étudié et de prendre en compte l'existence de tels scénarios dans la décision.

Apports opérationnels

Une démarche d'ingénierie des connaissances. associant information et décision est mise en place dans le cadre d'une approche intégrée. Elle s'étend de l'acquisition et de la caractérisation de l'imperfection de l'information jusqu'à l'exploitation dans le cadre d'outils d'aide

à la décision avec une perspective d'intégration dans des systèmes d'information de gestion des risques naturels.

Formalisation et reconnaissance de l'approche "naturaliste". L'approche propose un cadre méthodologique et un moyen de décrire les processus d'expertise "naturalistes" parfois dévalorisés par rapport à des méthodes plus quantitatives de modélisation numérique. L'approche permet une description explicite des hypothèses faites quant à l'estimation des données, la confiance dans l'évaluation faite et les éventuelles contradictions existant entre les sources d'information.

Améliorer traçabilité et qualité de l'expertise. La capitalisation, l'explicitation des composants du raisonnement constituent des contributions à l'amélioration de la traçabilité et de la qualité globale de l'expertise.

Un principe de co-construction de la décision. La méthodologie développée reprend les principes de l'aide multicritères à la décision qui repose sur la co-construction du modèle de décision entre l'analyste et le/les décideur(s). Cette attitude est ici un apport important pour permettre d'inscrire l'analyse du risque dans un cadre de gestion intégrée.

Une forme alternative de prise en compte de l'incertitude. Le risque constitue un objet d'étude au travers de ses différentes composantes : il s'agit d'une décision en environnement certain mais portant sur le risque. L'explicitation de l'incertitude concerne l'information utilisée pour analyser le risque et constitue en quelque sorte un facteur de décision. L'incertitude liée à l'analyse du risque (en tant qu'objet d'étude) est évaluée au travers de la structure du modèle hiérarchique sous forme de scénarios de réalisation du phénomène. Sur ces bases, les méthodologies proposées permettent la reconfiguration de modèles de décision hiérarchiques explicitant les scénarios possibles.

11.2.3 Associer l'analyse multicritères et la fusion d'information

Apports méthodologiques

Faire co-exister l'analyse multicritères et les théories de l'incertain La méthodologie proposée, dénommée *ER-MCDA* associe l'analyse multi-critère hiérarchique et plusieurs cadres théoriques de manipulation et traitement de l'information imparfaite. Les alternatives peuvent être évaluées (en vue de prendre une décision) en considérant l'importance relative des critères, la nature imprécise et incertaine des informations, la fiabilité et les contradictions entre des sources d'information. L'analyse multicritères hiérarchique sert de support conceptuel pour formuler hiérarchiquement le problème de décision et déterminer les préférences entre critères.

Des processus d'évaluation et de traitement séquentiels et dissociés Pour répondre à la problématique de caractérisation de l'incertitude et d'amélioration de la traçabilité de l'expertise, cette méthodologie aboutit de manière originale à une dissociation de l'évaluation des critères et de l'exploitation dans le cadre d'une décision. L'évaluation, la transposition, la fusion puis la décision sont des étapes séquentielles et indépendantes.

L'association de la fusion et de l'analyse multicritères hiérarchique implique trois étapes successives visant à transposer, fusionner, interpréter et décider :

- l'évaluation des critères sous forme imprécise et incertaine ;
- la transposition concerne l'expression des critères dans un cadre commun relatif à la décision à prendre. Les modèles de "transposition" quantitative et qualitative jouent le même

rôle qu'une fonction d'utilité dans le cadre des méthodes multicritères d'agrégation totale. Ils transforment dans un cadre commun des évaluations de critères de nature et de portée totalement différentes. Les modèles de transposition qualitative et quantitative expriment, pour chaque critère, le lien imaginé par l'expert analyste entre les grandeurs mesurées ou classes considérées et les classes d'évaluation de la décision. C'est au niveau de ces modèles de transposition que se trouve encapsulés le raisonnement et l'analyse de l'expert quant à la contribution du critère à la décision ;

- la fusion permet de combiner les informations transposées dans le cadre de décision commun, caractérisées par leur niveau d'incertitude et leur imprécision dans le choix de la classe d'évaluation de la décision : le résultat peut concerner précisément une classe mais de manière incertaine, ou plusieurs classes mais de manière certaine ;
- la décision correspond à l'interprétation des résultats de la fusion d'information en prenant en compte la qualité ("vérité") de l'information disponible.

Deux niveaux de fusion et une triple formulation du problème La méthodologie *ER-MCDA* repose sur deux niveaux de fusion. Le premier niveau de fusion opère au stade de l'évaluation des critères entre les sources réelles de l'information. Le second considère les critères comme des sources plus ou moins importantes. Dans ce cadre, la méthode permet la prise en compte effective de plusieurs sources potentiellement conflictuelles. Le conflit est géré soit au travers d'une modélisation basée sur la *DSmT*, soit au travers de règles de fusion avancées prenant en compte et gérant le conflit entre les sources dans le cadre de la *DST*.

La méthodologie implique également trois niveaux de formulation du problème :

- le premier niveau correspond à la formalisation et à la structuration hiérarchique du problème de décision.
- le second niveau concerne la définition du cadre de discernement de décision commun correspondant aux classes d'évaluation de la décision. Chacune des sources du processus de fusion doit exprimer un jeu de masses de croyance relativement à ces classes d'évaluation.
- le troisième niveau ne concerne que les classes d'évaluation de critères qualitatifs. Un modèle d'évaluation qualitative permet de représenter l'appartenance partielle à chacune des classes.

Utiliser un cadre théorique et des règles de fusion gérant le conflit. Par rapport aux approches existantes, la méthodologie *ER-MCDA* envisage un problème de décision plus complexe associant des critères quantitatifs et qualitatifs. Le cadre de discernement est constitué non pas par des alternatives mais par les classes de décision. Les nouvelles théories de l'incertain permettent de décrire et prendre en compte les informations imprécises, vagues et incertaines dans le cadre des théories des ensembles flous, des possibilités et enfin des fonctions de croyances au travers de la théorie de *Dempster-Shafer (DST)* et/ou de la théorie de *Dezert-Smarandache (DSmT)*. Sur ce point, la théorie *DSmT* et l'utilisation de règles de fusion gérant le conflit permettent d'une part de modéliser le problème de manière plus réaliste et d'autre part d'obtenir des résultats de fusion plus intuitifs et fiables.

Distinguer l'importance, l'incertitude et la fiabilité dans un même processus. Dans l'association d'une approche d'aide multicritères à la décision et d'un processus de fusion, il faut distinguer l'importance et la confiance dans l'information dans le processus de fusion et d'évaluation. Elle introduit le principe de facteur d'affaiblissement d'*importance* par rapport aux classiques facteurs d'affaiblissement relatifs à la *fiabilité*.

Apports opérationnels

Un intérêt pratique et une évolution de paradigme dans l'analyse de risque Au final, les méthodologies mises en œuvre permettent de répondre aux objectifs de traçabilité, de prise en compte de l'imprécision des évaluations et de diversité des avis des sources. Cette mise en œuvre s'appuie sur une double modélisation du problème de décision. La modélisation hiérarchique permet d'identifier les critères et de caractériser leur importance grâce à un modèle de normalisation spécifique. La modélisation du problème de fusion nécessite quant à elle la définition d'un cadre de discernement commun de décision dans lequel sont transposées les évaluations des critères. L'approche proposée combine de manière originale des méthodes d'aide à la décision et de représentation et de traitement des informations hétérogènes dans le contexte de la gestion des risques naturels. Il s'agit ici d'un éclairage nouveau et complémentaire par rapport aux méthodes existantes.

Une première contribution à une démarche qualité globale pour la gestion des risques L'approche de formalisation d'un processus d'expertise assimilé à une série de décisions est une première contribution dans le cadre de la mise en place d'une démarche qualité dans le domaine de la gestion des risques naturels. La plupart des approches existantes dans le domaine et décrivant des processus se sont focalisées sur les aspects liées aux organisations, aux acteurs et à leurs relations. Notre démarche s'intéresse quant à elle au contenu réel de l'expertise et à la manière dont sont produits les résultats situés en début de la chaîne d'analyse des risques.

11.3 Les perspectives et axes de développement

11.3.1 Les perspectives méthodologiques

L'analyse, le diagnostic et l'adaptation de méthodes d'aide multicritères à la décision dans le cadre l'expertise des risques naturels et l'association de ces méthodes avec la fusion d'information constituent des premières étapes qui soulèvent de nombreuses questions et perspectives de développement résumées ci-dessous.

Aide multicritères à la décision et expertise

Combiner approches multicritères, hybrides pour l'expertise. Pour analyser le risque sur la base de données disponibles dans un cadre statistique et de données d'expertise plus qualitatives mais tout aussi utiles, une perspective consisterait à associer dans un même cadre les modèles probabilistes bayésiens, les approches hybrides et les méthodes basées sur l'analyse multicritères. Dans ce cadre, les convergences théoriques entre la théorie des fonctions de croyances, les possibilités et les probabilités pourraient certainement être approfondies et exploitées. L'objectif serait de proposer une véritable approche intégrée de l'imperfection de l'information dans le cadre de l'expertise associant les différents types d'information et d'approches mises en œuvre.

Développer une méthodologie d'analyse comparée des méthodes. L'analyse et le diagnostic des modèles d'aide à la décision utilisent la méthode hiérarchique multicritères pour son intérêt au stade de la formulation du problème et sa proximité avec de nombreuses méthodes empiriques. Son mode d'agrégation est cependant reconnu comme basique et limité. D'autres méthodes d'agrégation évoquées mais non utilisées (forme multiplicative de l'*AHP*, agrégation mixte) doivent être envisagées dans le cadre d'applications d'aide à la décision. De manière générale, il est en effet indispensable de confronter plusieurs méthodes pour répondre à un problème d'aide à la décision. Dans sa conception, la méthode hiérarchique repose sur une agrégation complète et ne constitue pas une méthode universelle. Basée sur une technique d'agrégation

complète, elle correspond avant tout à une problématique de choix et suppose que l'ensemble des critères peut être évalué selon une échelle unique, impliquant d'exprimer des préférences entre tous les critères. Dans les cas d'incomparabilité de critères, les méthodes de sur-classement autorisent des comparaisons partielles et l'introduction de niveaux de préférence de manière beaucoup plus fine. Un cadre méthodologique rigoureux d'étude de sensibilité de ces méthodes serait un complément important en vue d'une meilleure mise en œuvre et analyse des résultats.

Association des approches multicritères et de la fusion d'information

Améliorer la détermination des masses de croyances et des facteurs d'affaiblissement. La détermination des masses de croyance pour les critères quantitatifs résulte de l'utilisation de distributions de possibilités. Pour les critères quantitatifs, la méthode est basée sur une transformation de poids en masses de croyance. D'autres méthodes alternatives, toujours qualitatives, existent et doivent être testées. De même, les facteurs de confiance associés aux sources sont postulés de manière arbitraire. Des méthodes multicritères peuvent être imaginées en amont pour définir ces valeurs.

Développer les analyses comparatives des processus de fusion. L'analyse et l'interprétation des processus de fusion doivent être poursuivis au niveau de la comparaison des ordres, règles et mode de fusion. Le cadre de la théorie de *Dezert-Smarandache* (*DSmT*), l'utilisation des règles de redistribution proportionnelle du conflit (*PCR*) constituent des choix à privilégier. Les méthodes de fusion qualitative sont également des pistes à explorer de manière comparative.

Discuter et améliorer les modèles de transposition. Les modèles de transposition constituent le point clé pour faire correspondre l'analyse multicritères et un cadre de fusion. Un processus de fusion d'information permet de combiner des informations incertaines, paradoxales provenant de sources plus ou moins fiables mais s'exprimant sur un cadre de décision commun nommé cadre de discernement. Il s'agit donc avant tout de déterminer un niveau de "vérité" associé à chacun des éléments focaux de ce cadre global. L'agrégation multicritères cherche, quant à elle, à identifier une décision résultant d'un compromis entre des évaluations de critères quantitatifs ou qualitatifs, exprimées sur des grandeurs dont la nature, les échelles et les unités sont différentes. Pour fusionner des informations, il faut au contraire que les informations se réfèrent à un cadre de discernement commun par rapport auquel chaque source doit exprimer des jeux de masse de croyance. Pour exploiter des avantages respectifs des deux approches dans un même cadre, il faut donc trouver un moyen de transformer ou "transposer" des évaluations numériques ou des évaluations qualitatives dans un même cadre. Des modèles de transposition sont développés pour établir cette correspondance entre les évaluations des critères quantitatifs et qualitatifs, issues de sources de fiabilité variable, avec un cadre de décision commun basé sur les théories de *Dempster-Shafer* (*DST*) ou de *Dezert-Smarandache* (*DSmT*). Situés à l'interface entre des méthodes et des cadres théoriques différents, ils sont certainement un des points les plus perfectibles ou discutables de la méthodologie et offrent des perspectives de développement importantes au niveau théorique.

Analyser les principes théoriques d'agrégation et de fusion. La méthodologie mise en œuvre n'exploite pas de méthode d'agrégation pour produire une décision. Une question sous-jacente demeure quant à la différence réelle entre les principes utilisés pour l'agrégation et la fusion d'information. Ce point théorique n'est pas abordé dans les quelques applications qui ont associé les approches multicritères et les théories des possibilités et des fonctions de croyance. Un travail spécifique ou une clarification serait utile pour mieux positionner les cadres théoriques les uns par rapport aux autres, ce que notre travail n'a pas du tout abordé.

Distinguer l'importance et l'incertitude. En associant l'analyse multicritères et la fusion d'information, l'objectif est de pouvoir différencier par exemple, un critère peu important dont l'évaluation est certaine d'un critère très important mais dont l'évaluation est incertaine. La fusion d'information permet classiquement de prendre en compte la fiabilité d'une source en affaiblissant les jeux de masses de croyance puis en affectant les masses sur l'ignorance totale. Les sources d'évaluation des critères sont affaiblies selon ce principe. L'appliquer pour caractériser une importance, comme proposé dans la littérature, n'apparaît pas totalement satisfaisant. L'utiliser au titre d'une différence d'importance conduit en fait à augmenter l'ignorance quand l'importance décroît. Ceci pose donc le problème de la prise en compte spécifique de l'importance et de la confiance dans un calcul de fusion. Des règles particulières de redistribution pourraient être imaginées.

En admettant, que l'on puisse différencier importance et confiance entre les critères, il demeure un délicat problème d'interprétation : comment va t'on décider et choisir entre importance et confiance dans l'évaluation ? Comment va t'on décider sur la base de deux critères dont l'un est important mais dont l'évaluation est peu fiable et un critère peu important avec une information fiable ? Ces deux critères ne sont peut-être tout simplement pas comparables ouvrant ici une perspective vers l'utilisation des méthodes d'agrégation partielle pour exploiter des résultats de fusion.

Valider la méthode constitue un double problème non résolu. En effet, la validation des méthodes d'aide à la décision ou de fusion d'information, considérées isolément les unes par rapport aux autres, constitue déjà un problème connu. Comment peut-on valider un processus de fusion ? Quelle est la signification de la validation ? La situation apparaît paradoxale. Est-ce que la méthode permet de prendre la "meilleure" décision, sachant que cette "meilleure" décision n'est pas connue, difficile à identifier et que le rôle de la méthode est justement d'aider à y voir plus clair ? Une procédure opérationnelle, forcément imparfaite, reste à définir.

Etendre l'approche au cadre de la décision dans l'incertain. Développer un modèle de décision dans l'incertain est un axe de développement important pour prendre en compte des niveaux de confiance associés aux différents scénarios. L'objectif est d'obtenir un modèle permettant de prendre en compte l'imperfection, l'incertitude dans l'évaluation des critères mais aussi dans la réalisation des scénarios auxquels ils se réfèrent. Les probabilités pignistiques obtenues dans le cadre de la théorie des fonctions de croyance peuvent trouver de nombreuses applications en remplacement de probabilités subjectives. Des modèles de décision dans l'incertain utilisent par exemple des probabilités pignistiques à la place des probabilités classiques. La criticité, souvent reconnue comme très subjective et résultant d'avis d'expert, pourrait être décrite de cette manière dans les analyses de la fiabilité en remplacement de probabilités classiques.

11.3.2 Les perspectives opérationnelles

Les perspectives opérationnelles s'inscrivent dans deux objectifs : le premier objectif concerne l'explicitation, la capitalisation des processus d'expertise et à la caractérisation de la qualité des données d'observation et du résultat d'expertise. Le second, plus général porte sur la mise en place d'une démarche d'utilisation des méthodes d'aide multicritères à la décision pour l'expertise.

La capitalisation et l'amélioration de la qualité des processus d'expertise

Les processus d'expertise comprennent de nombreuses phases séquentielles pouvant être décomposées dans le cadre d'approches systémiques. Elles peuvent correspondre à des problématiques ponctuelles notamment dans les phases les plus techniques de l'analyse des risques. Il peut

s'agir de déterminer et choisir des zones d'apports en matériaux d'un bassin versant torrentiel, de déterminer le volume d'une lave torrentielle, de comparer des stratégies de protection Ces sujets à envisager également sous leur aspect spatial constituent autant de perspectives de développement consistant à les formuler et les expliciter sous forme de problèmes de décision en lien avec les experts thématiques et disciplinaires. La mise au point d'une méthode de détermination de la sensibilité au risque torrentiel ou d'analyse de l'exposition d'infrastructures routières constituent d'ores et déjà des axes de développement engagés.

Une autre perspective concerne la caractérisation de la qualité de l'information acquise sur le terrain soit par analyse experte post-événement ou par recueil d'information. Des méthodes sont requises et attendues pour définir les critères de qualité de l'information. L'intégration de l'approche dans des systèmes d'information est un axe de développement important pour assurer de manière effective la traçabilité et l'inter-opérabilité des données. En ce sens, la structuration des bases de données doit d'ores et déjà être adaptée pour permettre une meilleure exploitation et une plus grande polyvalence des données collectées en respectant le principe d'une décision "3-tiers" basée sur une dissociation entre l'évaluation, le traitement et la décision.

L'utilisation des méthodes d'aide multicritères à la décision

Les méthodes d'aide à la décision présentent un intérêt certain pour faciliter l'explicitation de raisonnement et supporter une décision. Elles constituent des alternatives valables pour compléter les approches classiques essentiellement quantitatives utilisées dans le cadre de l'expertise des risques naturels. Parmi la multitude de méthodes multicritères, toutes ne permettent pas de représenter les structures de préférence des décideurs. Elles ne restent seulement que des *aides à la décision* et ne remplacent pas un processus de décision et de raisonnement humain. Deux principes doivent guider leur conception et leur mise en œuvre :

- leur intérêt réside autant dans la phase de construction et de formulation des problèmes que dans leur utilisation sur des cas concrets. Leur développement doit donc associer les décideurs finaux au risque de mettre en place des boîtes noires qui ne joueront pas leur rôle d'aide à la décision et ne pourront pas être "validées". A défaut d'avoir réellement participé à leur construction, le décideur n'aura de choix que de "croire" les résultats ou de s'en méfier et de les ignorer complètement ;
- les résultats fournis par les méthodes multicritères doivent être considérés en mesurant les limites des principes sous-jacents qui fondent ces méthodes. Aucune d'entre elles n'est supérieure aux autres sur tous les plans et le choix d'une méthode multicritères est en soit un problème multicritères. Ce principe, qui ne s'applique pas qu'aux méthodes multicritères, conduit à comparer les méthodes et à confronter les résultats.

Les aspects calculatoires et la recherche de solutions "presse-bouton" ne doivent donc pas occulter cette double nécessité. La formulation des problèmes de décision nécessitera certes une capacité de synthèse et de formalisation mais aussi suffisamment d'écoute pour suggérer sans influencer afin d'extraire ce qui permet de construire la décision. C'est pour ces raisons que la mise en place de ces approches multicritères correspond plus à un "art"¹ qu'à une technique que l'on applique de manière systématique. Cette dualité nécessite une grande ouverture d'esprit et milite à notre sens pour une association des sciences de l'ingénieur avec d'autres compétences issues des sciences humaines et sociales.

Si le lien entre l'information et la décision ne fait aucun doute, les relations entre la décision et l'imperfection de l'information sont moins évidentes. Les méthodes d'aide à la décision constituent des supports méthodologiques pour expliciter les hypothèses, échanger autour d'un problème de décision. Appliquées au contexte de l'expertise, elles peuvent être les outils d'une meilleure intégration de la démarche de gestion des risques en permettant la confrontation d'as-

1. (Roy, 1985)

pects non seulement techniques mais aussi sociaux, organisationnels, environnementaux, financiers dans un cadre beaucoup plus large et pluridisciplinaire.

11.4 L'objectif de la gestion intégrée des risques

L'analyse du contexte initial de la gestion des risques conduisait à évoquer la perspective et le cadre de la gestion intégrée en mettant en évidence la réalité de l'incertitude dans la décision et la nécessité d'une prise en compte de l'ensemble des facteurs techniques, sociaux, environnementaux Les approches proposées, bien que limitées à l'évaluation de composantes du risque, introduisent et mettent en avant l'intérêt des méthodes d'aide multicritères à la décision et de la fusion d'information pour mieux décrire les facteurs d'une décision. Aborder la thématique de l'expertise au travers de sa traçabilité et de ses liens avec la décision permet d'envisager une meilleure intégration dans le processus global de gestion des risques. Deux niveaux de décisions ont été distingués. L'utilisation et le développement de méthodes d'aide à la décision dans un cadre externe introduit de nombreux questionnements sur le mode de construction possible de systèmes d'aide à la décision, leur validation et l'influence et l'intérêt d'une meilleure représentation de l'imperfection de l'information (FIG. 11.1).

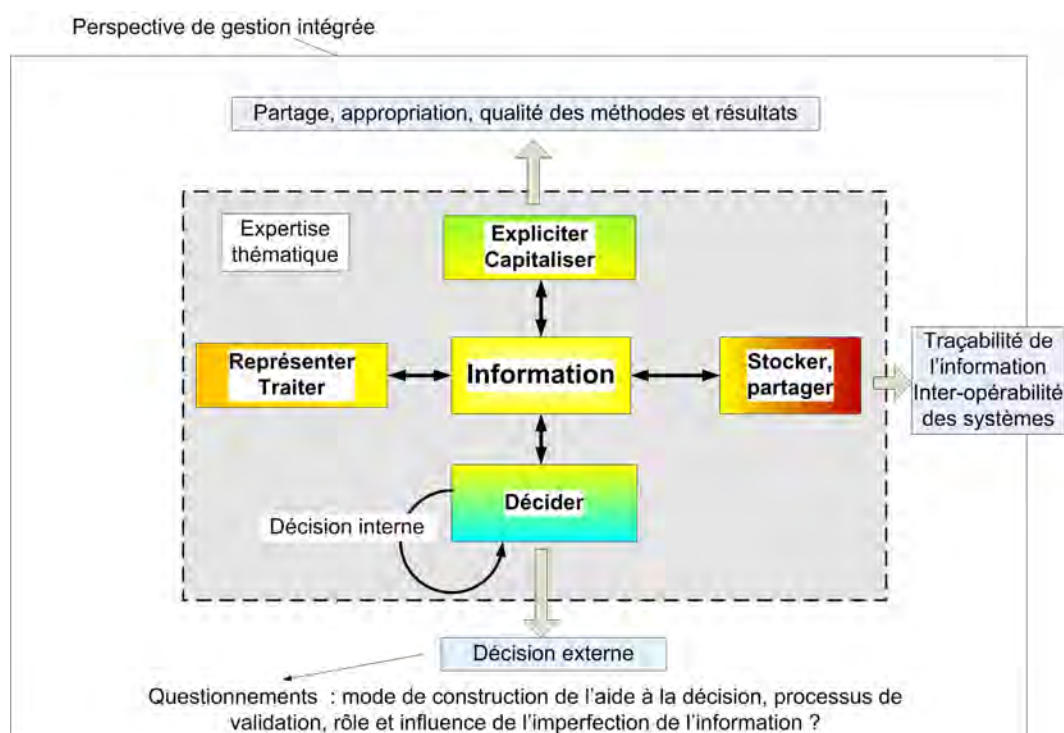


FIGURE 11.1 – Une réponse mais aussi des questionnements dans l'objectif d'une gestion intégrée

L'expertise comme passerelle entre l'analyse, l'évaluation et la gestion des risques

La gestion intégrée des risques considère les liens et collaborations entre les phases d'analyse et d'évaluation du risque. Cette approche associe implicitement les disciplines issues des sciences humaines et sociales et les sciences de l'ingénieur concernant plus spécifiquement les phases d'analyse de risque (FIG. 11.2). L'enjeu de la gestion intégrée est clairement de co-construire les modes de gestion associant les phases d'identification, d'analyse, d'évaluation conduisant aux décisions. Ce cadre global confirme, si besoin était, la place très partielle qu'occupe l'analyse de risque et les approches *aléa-centrées* qui la sous-tendent.

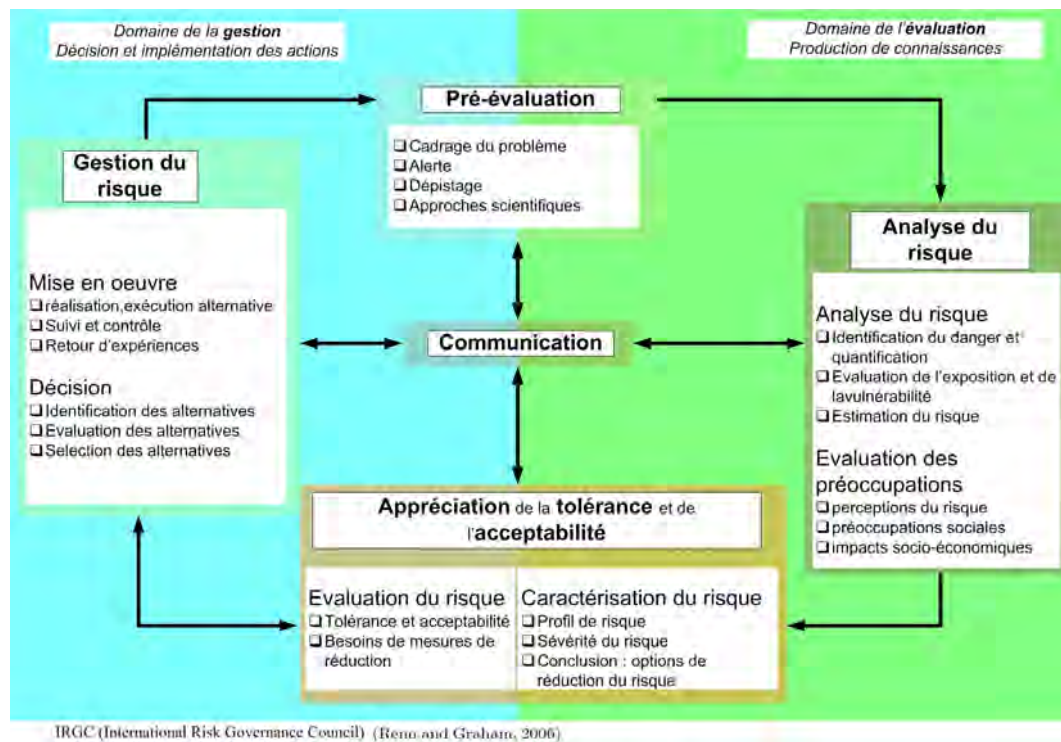


FIGURE 11.2 – Le cadre de gestion intégrée du risque (Renn and Graham, 2006)

Evaluer l'influence de l'imperfection de l'information

La démarche proposée permet une amélioration de la traçabilité et par conséquent de la qualité intrinsèque des expertises. Elle permet aux experts de représenter les liens qu'ils établissent entre l'analyse des phénomènes et les décisions. En assimilant l'expertise d'un processus de décision, elle la rapproche de ses utilisateurs et la rend plus accessible, compréhensible. Une hypothèse forte sous-tend ce travail : l'amélioration de la description de l'imperfection de l'information, certes satisfaisante d'un point de vue intellectuel, est-elle vraiment une attente de la société ? Comment la connaissance de ces imperfections, que l'on peut maintenant tracer et décrire, va-t-elle modifier, influencer le cas échéant les décisions et les modes de gestion des risques ? Est-ce que ces modèles ne seraient finalement pas que des objets "intermédiaires" (Vinck, 2009) ?

Ce travail apporte une réponse technique et s'inscrit dans une vision clairement exogène considérant que les risques sont ramenés à des dangers extérieurs auxquels il est possible de s'exposer. La vision endogène développée dans le cadre de la géographie des risques et des sciences humaines s'intéresse quant à elle au lien entre la nature et les sociétés humaines (Pigeon, 2005). Est-ce que l'approche proposée au travers de la décision et de l'expertise ne constituerait pas une sorte de passerelle entre l'analyse des risques (vision exogène) et l'"évaluation des risques" (vision endogène) (FIG. 11.3). En explicitant les composantes de l'expertise dans le cadre de méthodes d'aide multicritères à la décision, il s'établit une première connexion effective et opérationnelle avec les volets relatifs à l'évaluation des risques. La formulation d'un problème d'aide à la décision doit faire l'objet d'une co-construction avec les décideurs et offre un espace de discussion attendu. La pertinence de ces approches doit faire l'objet d'une analyse par les sciences humaines et sociales. Est-ce que toutes les imperfections de l'information et les incertitudes de nature physique sont vraiment importantes dans un contexte de décision qui se veut intégré ? Comment évaluer et mesurer toutes les formes de vulnérabilité ? Est-ce que la géographie des risques, les incertitudes et le contexte social, environnemental, économique, politique ne sont pas finalement déterminants ? Peut-on, doit-on prendre en compte ces critères, les évaluer et les combiner avec

les critères physiques ? Envisager les approches liées à l'analyse de la perception des risques, à la caractérisation et l'évaluation des différentes formes de vulnérabilité en utilisant les méthodes d'aide multicritères à la décision nous paraît possible (Tacnet et Richard, 2006).

L'approche proposée n'est pas la plus courante dans le domaine des sciences de l'ingénieur. Envisager une approche multicritères, renoncer à l'optimisation comme seule réponse aux problèmes de décision constitue déjà une remise en question importante. Au final, accepter et introduire des formes alternatives d'analyse du risque est peut-être la voie pour améliorer le lien entre les disciplines et les communautés scientifiques traitant du risque. Sur ces points, le recours aux Sciences Humaines et Sociales (SHS) est indispensable (November and Burton-Jeangros, 2003) dans le cadre d'une collaboration espérée fructueuse avec les sciences de l'ingénieur.

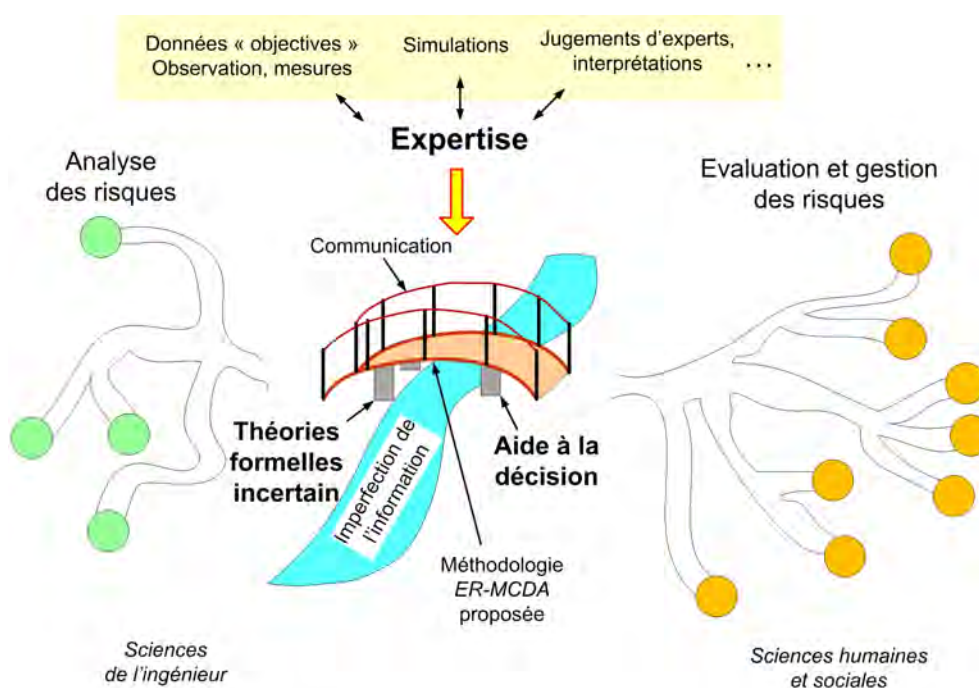


FIGURE 11.3 – Une méthodologie à l'interface entre l'analyse, l'évaluation et la gestion des risques

Bibliographie

- Abdellaoui, M. and Gonzales, C. (2006). *Concepts et méthodes pour l'aide à la décision 3 - analyse multicritère*, chapitre 1 - Théorie de l'utilité multiattribut. Hermès - Lavoisier, Paris.
- AFNOR (2003). Norme française NF X 50-110 - Qualité en expertise : Prescriptions générales de compétence pour une expertise. AFNOR, Saint-Denis La Plaine.
- Allard, P., Fox, D., et Picon, B., editors (2008). *Incertitude et environnement : la fin des certitudes scientifiques*. Collection Ecologie Humaine. EDISUD, Aix-en-Provence.
- Ancey, C. (2006). *Dynamique des avalanches*. Presses polytechniques universitaires romandes (Lausanne, Suisse) - Cemagref (Antony, France).
- Aven, T. (2007). A unified framework for risk and vulnerability analysis covering both safety and security. *Reliability Engineering & System Safety*, 92(6) :745–754.
- Aven, T. and Renn, O. (2009). The role of quantitative risk assessments for characterizing risk and uncertainty and delineating appropriate risk management options, with special emphasis on terrorism risk. *Risk Analysis*, 29(4) :587–600.
- Ayoun, A. and Smets, P. (2001). Data association in multi-target detection using the transferable belief model. *International Journal of Intelligent Systems*, 16(10) :1167–1182.
- Bae, H.-R., Grandhi, R. V., and Canfield, R. A. (2004). An approximation approach for uncertainty quantification using evidence theory. *Reliability Engineering & System Safety*, 86(3) :215–225.
- Barbolini (Ed.), M. (2008). Deliverable 3.1 - hazard mapping of extremely rapid mass movements in europe - state of the art methods in practice. Technical report, IRASMOS E.U. Project (contract 018412) - Integral Risk Management of Extremely Rapid Mass Movements - Work package 3.
- Barde, J., Libourel, T., et Maurel, P. (2004). Ontologies et métadonnées pour le partage de l'information géographique. *Revue internationale de géomatique*, 14 :199–216.
- Bardou, E. (2002). *Méthodologie de diagnostic des laves torrentielles sur un bassin versant alpin*. Thèse de doctorat - Sciences Techniques, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL).
- Barthes, J.-P. (2002). *Les systèmes d'information - Art et Pratiques*, chapitre Le management des connaissances. Editions d'Organisation, Paris.
- Baudrit, C. (2005). *Représentation et propagation de connaissances imprécises et incertaines : application à l'évaluation des risques liés aux sites et aux sols pollués*. Thèse de doctorat, Université Toulouse III -U.F.R. Mathématiques Informatique Gestion, Toulouse.

- Baudrit, C., Guyonnet, D., and Dubois, D. (2005a). Postprocessing the hybrid method for addressing uncertainty in risk assessments. *Journal of Environmental Engineering*, 131(12) :1750–1754.
- Baudrit, C., Mercat-Rommens, C., et Chojnacki, E. (2005b). Influence de la représentation mathématique de la connaissance sur les résultats de calcul de risque - rapport dei/sesure n°2005-14. Technical report, IRSN (Institut de Radioprotection et de Sécurité Nucléaire), Le Vesinet.
- Baudrit, C., Guyonnet, D., and Dubois, D. (2007). Joint propagation of variability and imprecision in assessing the risk of groundwater contamination. *Journal of Contaminant Hydrology*, 93(1-4) :72–84.
- Beauzamy, B. (2008). Concilier pragmatisme et rigueur. *La Jaune et le Rouge - Dossier " La gestion des incertitudes"*, Février 2008 :7–11.
- Beck, U. (1992). *Risk Society : Towards a new modernity*. SAGE Publications.
- Berger, F., Bertin, C., Chahine, M., Depinois, S., Laigle, D., Livet, M., Mathon, C., Nedellec, J., Restituto, J., Rocher, P., Tacnet, J.-M., et Lavina, P. (2004). Les egravats - commune du mont-dore (63). evaluation de l'aléa relatif aux coulées de boue, glissements de terrain et éboulements rocheux - définition et chiffrage de solutions de mise en sécurité pour le lotissement et la route départementale - rapport brgm-cemagref-lrpc rp-53443-fr. Technical report.
- Berners-Lee, T., Hendler, J. A., and Lassila, O. (2001). The semantic web. *Scientific American*, 284(5) :34–43.
- Beynon, M., Curry, B., and Morgan, P. (2000). The Dempster-Shafer theory of evidence : an alternative approach to multicriteria decision modelling. *Omega*, 28(1) :37–50.
- Beynon, M. (2002). Ds/ahp method : A mathematical analysis, including an understanding of uncertainty. *European Journal of Operational Research*, 140(1) :148–164.
- Beynon, M. (2005a). A method of aggregation in ds/ahp for group decision-making with the non-equivalent importance of individuals in the group. *Computers and Operations Research*, 32 :1881–1896.
- Bevilacqua, M. and Braglia, M. (2000). Analytic hierarchy process applied to maintenance strategy selection. *Reliability Engineering and System Safety*, 70(1) :71–83.
- Binaghi, E., Luzi, L., Madella, P., Pergalani, F., and Rampini, A. (1998). Slope instability zonation : A comparison between certainty factor and fuzzy Dempster-Shafer approaches. *Natural Hazards*, 17(1) :77–97.
- Bischof (Ed.), N. (2008). Deliverable 3.2 - european integral risk management workshop report. Technical report, IRASMOS E.U. Project (contract 018412) - Integral Risk Management of Extremely Rapid Mass Movements - Work package 3.
- Bloch, I., Hunter, A., Appriou, A., Ayoun, A., Benferhat, S., Besnard, P., Cholvy, L., Cooke, R., Cuppens, F., Dubois, D., Fargier, H., Grabisch, M., Kruse, R., Lang, J., Moral, S., Prade, H., Saffiotti, A., Smets, P., and Sossai, C. (2001). Fusion : General concepts and characteristics. *International Journal of Intelligent Systems*, 16(10) :1107–1134.
- Bodin, X. (2002). La représentation des incertitudes spatiales de la carte de localisation probable des avalanches - mémoire de maîtrise. Technical report, Institut de Géographie Alpine, Université Joseph Fourier 1, Grenoble.

- Bonissone, P. P. and Tong, R. M. (1985). Editorial : Reasoning with uncertainty in expert systems. *International Journal of Man-Machine Studies*, 22(3) :241–250.
- Bouchon-Meunier, B. (1995). *La logique floue et ses applications*. Editions Addison-Wesley France, SA, Paris.
- Bouchon-Meunier, B., Marsala, C., et Rifqi, M. (2003). *Logique floue, principes, aide à la décision*, chapitre Introduction, pages 17–39. Hermes-Lavoisier, Paris.
- Bouchon-Meunier, B. and Marsala, C. (2003). *Logique floue, principes, aide à la décision*, chapitre Méthodes de raisonnement, pages 121–147. Hermes-Lavoisier, Paris.
- Boudières, V. (2007). *De la gestion des risques aux risques de leur gestion dans les territoires touristiques de la montagne. Modalité de gestion du risque d’avalanche dans les Alpes françaises et facteurs de vulnérabilité associés*. Thèse de doctorat. Géographie, Université Grenoble 1 - Joseph Fourier - U.F.R de Géographie, Grenoble.
- Boudières, V. et Marcelpoil, E. (2009). *Risques et environnement : recherches interdisciplinaires sur la vulnérabilité des sociétés*, chapitre Avalanches et territoires touristiques de montagne. Pour une prise en compte des facteurs actifs de vulnérabilité propres aux modalités de réponse au problème risque, pages 457–467. Editions l’Harmattan.
- Bourrelier, P.-H., Deneufbourg, G., Grassin, J., Huet, P., de Vanssay, B., et Vazelle, J.-D. (1997). *La prévention des risques naturels - Rapport de l’instance d’évaluation - Premier Ministre - Commissariat général du Plan - Comité interministériel de l’évaluation des politiques publiques*. La Documentation Française.
- Bourrelier, P.-H., Deneufbourg, G., et de Vanssay, B. (2000). *Les catastrophes naturelles : le grand caillouillage*. Série Santé et Société. Osman Eyrolles Multimedia, Paris.
- Bouyssou, D. (1989). Modelling inaccurate determination, uncertainty, imprecision using multiple criteria. *Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems*, 335 :78–87.
- Bouyssou, D. et Roy, B. (1993). *Aide Multicritère à la Décision : méthodes et cas*. Collection Gestion - Série Production et techniques quantitatives appliquées à la gestion. Economica, Paris.
- Bouyssou, D. and Vincke, P. (2002). An introduction to preference modeling- une introduction à la modélisation des préférences. *INFOR Journal*, 40(4) :307–318.
- Bouyssou, D. (2003). La ‘crise de la recherche opérationnelle’, 25 ans après. *Mathématiques et Sciences Humaines*, 41ème année(n°161) :7–27.
- Bouyssou, D., Dubois, D., Pirlot, M., et Prade, H. (2006). *Concepts et méthodes pour l’aide à la décision*, chapitre Avant-propos, pages 15–21. Hermes-Lavoisier, Paris.
- Bouyssou, D. et Pirlot, M. (2006). *Concepts et méthodes pour l’aide à la décision 3 - analyse multicritère*, chapitre 2 - Mesurage conjoint et modèles relationnels de préférences. Hermès - Lavoisier, Paris.
- Brochot, S. (1990). Définition et prévention des crues torrentielles en haut-vallespir. Rapport technique, Cemagref, Grenoble.
- Brochot, S. (2001). *L’insertion des connaissances dans l’action publique locale : les cas des risques naturels*. Mémoire de DEA, Université Pierre Mendès France - Institut d’études politiques de Grenoble, Grenoble.

- Brochot, S., Duclos, P., et Bouzit, M. (2003). L'évaluation économique des risques torrentiels : intérêts et limites pour les choix collectifs de prévention. *Ingénieries numéro spécial "risques"*, pages 53–68.
- Brundl (Ed.), M., Fuchs, S., Sandersen, F., Kveldsvik, V., Eidsvig, U., Bischof, N., Korup, O., Rheinberger, C., Romang, H., and Barbolini, M. (2008). Deliverable 5.2 : Integral risk management of snow avalanches, rock avalanches and debris flows in europe. Technical report, IRASMOS E.U. Project (contract 018412) - Integral Risk Management of Extremely Rapid Mass Movements.
- Bryson, N., Ngwenyama, O. K., and Mobolurin, A. (1994). A qualitative discriminant process for scoring and ranking in group support systems. *Information Processing and Management*, 30(3) :389–405.
- Bryson, N. K.-M. and Mobolurin, A. (1999). A process for generating quantitative belief functions. *European Journal of Operational Research*, 115(3) :624–633.
- Buisson, L. (1990). *Le raisonnement spatial dans les systèmes à base de connaissances - Application à l'analyse de sites avalanches*. Thèse de doctorat, Université Grenoble 1 - Joseph Fourier - Sciences et Géographie, Grenoble.
- Buisson, L. (1998). *Systèmes d'information, bases de connaissances et aide à la décision : quelques applications aux risques naturels*. Habilitation à diriger des recherches, Université Grenoble 1 - Joseph Fourier - Sciences et Géographie, Grenoble.
- Burrough, P. A. and McDonnel, R. A. (2004). *Principles of Geographical Information Systems*. Spatial Information Systems and Geostatistics. Oxford University Press, Oxford, 5^{ème} édition.
- Canobbio, E. (2008). *Incertitude et environnement - La fin des certitudes scientifiques*, chapitre L'expert, l'élu et le citoyen. Quelques réflexions d'un élu-géographe autour de la gestion actuelle des risques naturels majeurs, pages 305–319. Série Ecologie Humaine. Société d'Ecologie Humaine, Aix-En-Provence.
- CGM (2004). La confiance et l'incertain : le rôle de l'État - "experts, expertises et confiance" - forum confiance mai 2004 - rapport collectif. Rapport technique, Conseil Général des Mines, Paris.
- Chambon, G., Escande, S., Laigle, D., et Tacnet, J. (2005). Torrent du nant d'armancette - commune des contaminées-montjoie (haute-savoie, france) - compte-rendu de la visite du 31/08/05 : analyse de l'événement du 22/08/05. Rapport technique, Cemagref - Unité de recherche Erosion Torrentielle Neige Avalanches (ETNA).
- Chang, C.-W., Wu, C.-R., and Lin, H.-L. (2009). Applying fuzzy hierarchy multiple attributes to construct an expert decision making process. *Expert Systems with Applications*, 36 :7363–7368.
- Charlier, C. (1998). La négociation du risque en montagne dans *Prévenir les risques : de quoi les experts sont-ils responsables ?*, Editions de l'Aube.
- Chauviteau, C. et Vinet, F. (2006). La vulnérabilité des établissements recevant du public et des entreprises face aux inondations : une méthode d'analyse appliquée dans le bassin de l'orb (hérault). *Ingénieries*, Vol. 46 :15–33.
- Chen, K., Blong, R., and Jacobson, C. (2001). MCE-RISK : integrating multicriteria evaluation and GIS for risk decision-making in natural hazards. *Environmental Modelling & Software*, 16(4) :387–397.

- Chojnacki, E. (2005). Guide utilisateur sunset - version mai 2005. Technical report, ISRN (Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire), Cadarache, France.
- Cligniez, V. (1998). *Un outil de représentation générique de l'espace pour l'étude des risques naturels*. Thèse de doctorat, Université Jean Monnet, Saint-Etienne.
- Climaco, J. C. N. (2004). A critical reflection on optimal decision. *European Journal of Operational Research Management of the Future MCDA : Dynamic and Ethical Contributions*, 153(2) :506–516.
- Corgne, S. (2004). *Modélisation prédictive de l'occupation des sols en contexte agricole intensif : application à la couverture hivernale des sols en Bretagne*. Thèse de doctorat, Université de Rennes 2 - Haute-Bretagne, Rennes.
- Corgne, S., Hubert-Moy, L., Dezert, J., and Mercier, G. (2006). *Advances and applications of DSMT for Information Fusion - Collected works - Volume 1*, chapter Application of DSMT for Land Cover Change Prediction - Chapter 17, pages 371–382. American Research Press, Rehoboth, USA.
- Curt, C. (2008). *Evaluation de la performance des barrages en service basée sur une formalisation et une agrégation des connaissances - Application aux barrages en remblai*. Thèse de doctorat, Université Blaise Pascal - Clermont 2, Clermont-Ferrand.
- Debreu, G. (1954). *Decision Processes*, chapter Representation of a preference ordering by a numerical function, pages 159–175. John Wiley & Sons, New-York.
- Decrop, G. et Charlier, C. (1997). *De l'expertise scientifique au risque négocié : le cas du risque en montagne*. Cemagref Editions, Antony.
- de Finetti, B. (1937). La prévision : ses lois logiques, ses sources subjectives. *Annales de l'institut Henri Poincaré*, tome VII(fasc. 1) :p. 1–68.
- de Florian, J.-P. C. (1792). *L'Aveugle et le Paralytique*. Fables.
- DelVecchio, S. (2006). *Mesure quantitative des impacts de risque en contexte d'impartition*. Rapport de Master, HEC - Université de Montréal, Montreal.
- Dempster, A. (1967). Upper and lower probabilities induced by multivalued mapping. *Annals of Mathematical Statistics*, Vol. AMS-38 :p. 325–339.
- Deymier, C., Tacnet, J.-M., et Mathys, N. (1995). *Conception et calcul de barrages de correction torrentielle - n°18*. "Etudes" du Cemagref - Série Equipements pour l'eau et l'environnement. Cemagref - Dicova, Antony.
- Dezert, J. (2002). Foundations for a new theory of plausible and paradoxical reasoning. *Information and Security Journal*, 9 :13–57.
- Dezert, J. (2003). Fondations pour une nouvelle théorie du raisonnement plausible et paradoxal. application à la fusion d'informations incertaines et conflictuelles - rapport n° rt 1/06769/dtim. Rapport technique, ONERA - Département Traitement de l'Information et Modélisation.
- Dezert, J. and Smarandache, F., editors (2004). *Advances and Applications of DSMT for Information Fusion - Collected works - Volume 1*. American Research Press, Rehoboth, USA.

- Dezert, J. and Smarandache, F. (2006). *Advances and applications of DSmT for Information Fusion - Collected works - Volume 2* - <http://www.gallup.unm.edu/smarandache/DSmT-book2.pdf>, chapter Proportional Conflict Redistribution Rules for Information Fusion. American Research Press, Rehoboth, USA.
- Dezert, J. and Smarandache, F. (2009). *Advances and applications of DSmT for Information Fusion - Collected works - Volume 3*, chapter 1 : An introduction to DSmT. American Research Press, Rehoboth, USA.
- Dictionnaire Le Robert (1993). *Le nouveau petit Robert*. Editions Dictionnaires Le Robert, Paris.
- Djiknavorian, P. and Grenier, D. (2006). *Advances and applications of DSmT for Information Fusion - Collected works - Volume 2* - [site web : gallup.unm.edu/smarandache/DSmT-book2.pdf](http://www.gallup.unm.edu/smarandache/DSmT-book2.pdf), chapter 15 : Reducing DSmT hybrid rule complexity through optimization of the calculation algorithm, pages 365–430. American Research Press, Rehoboth, USA.
- Dorren, L. and Heuvelink, G. (2004). Effect of support size on the accuracy of a distributed rockfall model. *International Journal of Geographical Information Science*, pages 595–609.
- Dress, F. (2004). *Probabilités et statistiques de A à Z : 500 définitions, formules et tests d'hypothèses*. Dunod, Paris.
- Dubois, D. (1983). *Modèles mathématiques de l'imprécis et de l'incertain en vue d'applications aux techniques d'aide à la décision*. Thèse de doctorat, Université Scientifique et Médicale de Grenoble - Institut National Polytechnique de Grenoble, Grenoble.
- Dubois, D. and Prade, H. (1988). *Possibility Theory : An approach to Computerized Processing of Uncertainty*. Plenum Press, New York (U.S.A).
- Dubois, D., NGuyen, H., and Prade, H. (2000). *Fundamental of Fuzzy Sets*, chapter Possibility theory, probability and fuzzy sets : Misunderstandings, bridges and gaps, pages 343–438. The Handbook of Fuzzy Sets Series. Kluwer Academic Publishers, Boston, Massachusetts, USA.
- Dubois, D., Grabisch, M., Prade, H., and Smets, P. (2001). Using the transferable belief model and a qualitative possibility theory approach on an illustrative example : The assessment of the value of a candidate. *International Journal of Intelligent Systems*, 16(11) :1245–1272.
- Dubois, D. and Prade, H. (1998). Representation and combination of uncertainty with belief functions and possibility measures. *Computational Intelligence*, 4 :244–264.
- Dubois, D. et Prade, H. (2006). *Concepts et méthodes pour l'aide à la décision 1 - Outils de modélisation*, chapitre 3 - Représentations formelles de l'incertain et de l'imprécis. Hermès - Lavoisier, Paris.
- Dyer, J. (2005). *Multiple Criteria Decision Analysis : State of the Art Surveys*, chapter Maut - Multiattribute Utility theory. International Series in Operations Research and Management Science. Springer, New-York.
- Eckert, N., Parent, E., Faug, T., and Naaim, M. (2008a). Bayesian optimal design of an avalanche dam using a multivariate numerical avalanche model. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, pages 1–19.
- Eckert, N., Parent, E., Faug, T., and Naaim, M. (2008b). Optimal design under uncertainty of a passive defense structure against snow avalanches : From a general bayesian framework to a simple analytical model. *Natural Hazards and Earth System Science*, 8(5) :1067–1081.

- Entani, T., Sugiharar, K., and Tanaka, H. (2006). Analytic hierarchy process based on fuzzy analysis. *Advances in Soft Computing*, Vol. 33 :301–309.
- Ewald, F., Gollier, C., et de Sadeleer, N. (2001). *Le principe de précaution*. Presses Universitaires de France.
- Fenton, N. and Wang, W. (2006). Risk and confidence analysis for fuzzy multicriteria decision making. *Knowledge-Based Systems*, 19(6) :430–437.
- Fievet, G. (2002). *Les systèmes d'information -Art et pratiques*, chapitre Relever le défi de l'incertitude par la stratégie. Editions d'Organisation, Paris.
- Figueira, J., Greco, S., and Ehrgott, M., editors (2005). *Multiple Criteria Decision Analysis : State of the art surveys*, volume 57. Springer, Boston, London.
- FLOODSITE (2005). Language of risk - project definitions, floodsite consortium, report t-32-04-01. Technical report, FloodSite Project Consortium.
- Fowler, M. (2002). *UML (traduit de l'anglais UML distilled, Second Edition)*. Le tout en poche. Campus Press, Paris.
- Forman, E. H. (1993). Facts and fictions about the analytic hierarchy process. *Mathematical and Computer Modelling*, 17(4-5) :19–26.
- Forman, E. and Selly, M. A. (2002). *Decision by Objectives*. World Scientific Publishing, Singapore.
- France-Lanord, B. (2002). *Les systèmes d'information -Art et pratiques*, chapitre La problématique des systèmes d'information. Editions d'Organisation, Paris.
- Fuchs, S., Heiss, K., and Hübl, J. (2007). Towards an empirical vulnerability function for use in debris flow risk assessment. *Natural Hazards and Earth System Science*, 7(5) :495–506.
- Fuchs, S. (2008). Empirical vulnerability function for use in debris flow risk assesment. Technical report, IRASMOS E.U. Project (contract 018412) - Integral Risk Management of Extremely Rapid Mass Movements - Work package n°4.
- Funtowicz, S. O. and Ravetz, J. R. (1993). Science for the post-normal age. *Futures*, 25(7) :739–755.
- Galland, J.-P. (1995). Risque, probabilités et assurance : pourquoi les corpus des sciences du risque, tantôt sont utilisés, tantôt non ? *Annales des Ponts et Chaussées*, 76 :33–41.
- Gaussin, A. S. (2009). Caractérisation des aléas, enjeux et risques naturels sur routes départementales. Rapport technique, Conseil Général des Hautes-Alpes - Pôle Aménagement et Développement - Direction des Infrastructures et des Transports.
- Gilbert, C. (1995). Les politiques de traitement des risques naturels et industriels : entre symbolisme et pragmatisme. *Annales des Ponts et Chaussées*, 76 :11–20.
- Gonod, P. F. (1996). Dynamique des systèmes et méthodes prospectives. *Futuribles International - Travaux et Recherches en Prospective*, 2 :1–66.
- Gonod, P. F. (2000). Penser l'incertitude - atelier du programme européen mcx - "modélisation de la complexité".

- Grabisch, M. et Perny, P. (2003). *Logique floue, principes, aide à la décision*, chapitre Agrégation multicritère, pages 81–120. Hermes-Lavoisier, Paris.
- Guilhou, X. et Lagadec, P. (2002). *La fin du risque zéro*. Eyrolles, Paris.
- Guitouni, A. and Martel, J.-M. (1998). Tentative guidelines to help choosing an appropriate mcda method. *European Journal of Operational Research*, 109(2) :501–521.
- Guo, M., Yang, J.-B., Chin, K.-S., and Wang, H. (2007). Evidential reasoning based preference programming for multiple attribute decision analysis under uncertainty. *European Journal of Operational Research*, 182(3) :1294–1312.
- Guyonnet, D., Bourguine, B., Dubois, D., Fargier, H., Côme, B., and Chilès, J.-P. (2003). Hybrid approach for addressing uncertainty in risk assessments. *Journal of Environmental Engineering*, 129(1) :68–78.
- Ha Duong, M. (2004). *Modèles de précaution en économie : introduction aux probabilités imprécises*. Habilitation à diriger des recherches, Ecole des Hautes Etudes en Sciences Sociales, Paris.
- Haenni, R. (2002). Are alternatives to Dempster’s rule of combination real alternatives? comments on ”about the belief function combination and the conflict management problem” - lefevre et al. *Information Fusion*, 3(3) :237–239.
- Helton, J. C. (1997). Uncertainty and sensitivity analysis in the presence of stochastic and subjective uncertainty. *Journal of Statistical Computation and Simulation*, 57(1-4) :3–76.
- Heuer, R. (1999). *The psychology of intelligence analysis*. Central Intelligence Agency - Center for Intelligence Study - available online e-book.
- Hicham, H. (2005). *Gestion des risques naturels : une approche fondée sur l’intégration des données*. Thèse de doctorat. Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées (INSA), Lyon.
- Houdant, B. (2004). *Contribution à l’amélioration de la prévision hydrométéorologique opérationnelle. Pour l’usage des probabilités dans la communication entre acteurs* - Thèse de doctorat. PhD thesis, Ecole Nationale du Génie Rural des Eaux et des Forêts, Paris.
- Hua, Z., Gong, B., and Xu, X. (2008). A ds-ahp approach for multi-attribute decision making problem with incomplete information. *Expert Systems with Applications*, 34(3) :2221–2227.
- Hübl, J., Kienholz, H., and Loipersberger, A. (2002). Domodis - documentation of mountain disasters : State of discussion in the european mountain areas. Technical report, Internationale Forschungsgesellschaft INTERPRAEVENT, Klagenfurt.
- Indrayan, A. (2002). Aleatory and epistemic uncertainties in official assesments. In *IAOS (Internal Association for Official Statistics) 2002*, London.
- ISDR (2004). Living with risk : a global view of reduction initiatives. Technical report, International Strategy for Disaster Reduction (ISDR) , United Nations.
- ISO (2002). Guide 73 : Risk management - vocabulary - guidelines for use in standards. Technical report, International Standard Organization.
- ISO (2005). Norme ISO 9000 : 2005 - systèmes de management de la qualité - principes essentiels et vocabulaire. Technical report, Organisation Internationale de Standardisation (International Organization for Standardization).

- ISO (2008). Norme ISO 9001 : 2008 - systèmes de management de la qualité - exigences. Technical report, Organisation Internationale de Standardisation (International Organization for Standardization).
- ISO (2009). ISO 31000 : Risk management - principles and guidelines. Technical report, International Standard Organization.
- Jabeur, K. et Martel, J.-M. (2005). La décision de groupe : application de méthodes de surclassement de synthèse. *Bulletin du Groupe de Travail Européen "Aide multicritère à la décision"*, Série n°3(n°11 - Printemps 2005).
- Kahneman, D. and Tversky, A. (1979). Prospect theory : An analysis of decision under risk. *Econometrica*, 47 :263–291.
- Keeney, R. and Raiffa, H. (1976). *Decisions with multiple objectives; preferences and values trade-offs*. J.Wiley and Sons, New York.
- Klinke, A. and Renn, O. (2002). A new approach to risk evaluation and management : Risk-based, precaution based, and discourse based strategies. *Risk Analysis*, 22(6) :1071–1094.
- Klir, G. and Smith, R. (2001). On measuring uncertainty and uncertainty-based information : Recent developments. *Annals of Mathematics and Artificial Intelligence*, 32(1-4) :5–33.
- Knublauch, H., Rector, A., Stevens, R., and Wroe, C. (2004). *A Practical Guide To Building OWL Ontologies Using the Protégé-OWL Plugin and CO-ODE Tools Edition 1.0*. The University of Manchester.
- Kourilsky, P. et Viney, G. (2000). *Le principe de précaution - Rapport au premier ministre*. Odile Jacob, Paris.
- Krantz, D., Luce, D., Suppes, P., and Tversky, A. (1971). *Foundations of measurement*. Academic Press, London, first edition edition.
- Kumar, N. V. and Ganesh, L. S. (1996). An empirical analysis of the use of the analytic hierarchy process for estimating membership values in a fuzzy set. *Fuzzy Sets and Systems*, 82(1) :1–16.
- Kuo, M.-S., Liang, G.-S., and Huang, W.-C. (2006). Extensions of the multicriteria analysis with pairwise comparison under a fuzzy environment. *International Journal of Approximate Reasoning*, 43(3) :268–285.
- Lacroix, E. (2005). *Risques naturels en montagne : aspects juridiques de l’affichage de l’incertitude dans les expertises - Master 2 Professionnel "Droit et développement de la montagne"*. PhD thesis, Cemagref - Université Pierre Mendès France - Grenoble II, Grenoble.
- Lacroix, F. (2006). *Dynamique des avalanches*, chapitre Préface. Presses polytechniques universitaires romandes - Cemagref, Lausanne, Suisse - Antony, France.
- Laaribi, A. (2000). *SIG et analyse multicritère*. Hermes Sciences Publications, Paris.
- Lardon, L. (2004). *Représentation et gestion des incertitudes pour le diagnostic par la théorie de Dempster-Shafer. Application aux procédés biologiques*. Thèse de doctorat - Science et procédé biologiques et industriels, Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier, Montpellier.
- Lefevre, E., Colot, O., and Vannoorenberghe, P. (2002). Belief function combination and conflict management. *Information Fusion*, 3(2) :149–162.

- Lefevre, E., Colot, O., and Vannoorenberghe, P. (2003). Reply to the comments of r. haenni on the paper "belief functions combination and conflict management". *Information Fusion*, 4(1) :63–65.
- Leone, F. (1996). *Concept de vulnérabilité appliqué à l'évaluation des risques générés par les phénomènes de mouvement de terrain - Thèse de doctorat*. PhD thesis, Université Grenoble 1 - Joseph Fourier - Sciences, Techniques et Médecine, Grenoble.
- Linkov, I., Satterstrom, F., Kiker, G., Batchelor, C., Bridges, T., and Ferguson, E. (2006). From comparative risk assessment to multi-criteria decision analysis and adaptive management : Recent developments and applications. *Environment International Environmental Risk Management - the State of the Art*, 32(8) :1072–1093.
- Liu, W. (2006). Analyzing the degree of conflict among belief functions. *Artificial Intelligence*, 170(11) :909–924.
- Lucas, P. and van der Gaag, L. (1991). *Principles of expert systems*. Addison-Wesley, Reading, MA.
- Luce, D. (1956). Semiorders and a theory of utility discrimination. *Econometrica*, 24 :178–191.
- Luce, R.D. Tukey, J. W. (1964). Simultaneous conjoint measurement : a new type of fundamental measurement. *Journal of Mathematical Psychology*, Vol.1 :1–27.
- Magne, L. et Vasseur, D. (2006). *Risques industriels. complexité, incertitude et décision : une approche interdisciplinaire*, chapitre 9 : le risque et sa gestion entre incertitude et ajustement de règles. Collection EDF R&D. Lavoisier, Paris.
- Marichal, J.-L. (2006). *Concepts et méthodes pour l'aide à la décision 3 - Analyse multicritère*, chapitre 3 - Fonctions d'aggrégation pour la décision. Hermès - Lavoisier, Paris.
- Martel, J.-M. (1999). L'aide multicritère à la décision : méthodes et applications. *Bulletin de la Société Canadienne de Recherche Opérationnelle*, Volume 33(n°1 - Février 1999).
- Martin, A. (2005). "fusion de classifieurs pour la classification d'images sonar". *Revue des Nouvelles Technologies de l'Information - Extraction des connaissances : État et perspectives*, Novembre 2005. :pp 259–268.
- Martin, A. and Osswald, C. (2006). *Advances and applications of DSMT for Information Fusion - Collected works - Volume 2*, chapter A new generalization of the proportional conflict distribution rule stable in terms of decision. American Research Press, Rehoboth, USA.
- Martin, A. and Quidu, I. (2008). Decision support with belief functions theory for seabed characterization. In *Proceedings of the 11th International Conference on Information Fusion, FUSION 2008*.
- Martin, A. (2008b). Aide à la décision crédibiliste et rejet pour la reconnaissance d'images texturées. In *Actes - Rencontres francophones sur la logique floue et ses applications - Lens, France - 16 au 17 Octobre 2008*.
- Martin, A. (2009). *Advances and Applications of DSMT for Information Fusion, (Collected Works, Vol. 3)*, chapter Implementing general belief function framework with a practical codification for low complexity. American Research Press, Rehoboth, USA, 2009.

- Masson, M.-H. (2005). *Apports de la théorie des possibilités et des fonctions de croyance à l'analyse de données imprécises*. Habilitation à diriger des recherches, Université de Technologie de Compiègne, Compiègne.
- Matos, M. A. (2007). Decision under risk as a multicriteria problem. *European Journal of Operational Research*, 181(3) :1516–1529.
- Maystre, L. Y., Pictet, J., and Simos, J. (1994). *Méthodes multicritères ELECTRE - Description, conseils pratiques et cas d'application à la gestion environnementale*. Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne.
- MEEDDAT (2009). Plans de prévention des risques naturels - les risques d'inondations - les crues des torrents de montagne. Technical report, Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, Du Développement Durable et de l'Aménagement du Territoire (MEEDDAT) - Service des risques naturels et hydrauliques, Paris.
- Meinadier, J.-P. (2002). *Les systèmes d'information - Art et pratiques*, chapitre L'intégration des systèmes. Editions d'Organisation, Paris.
- Merad, M. M., Verdel, T., Roy, B., and Kouniali, S. (2004). Use of multi-criteria decision-aids for risk zoning and management of large area subjected to mining-induced hazards. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 19(2) :125–138.
- Mercat-Rommens, C., Chojnacki, E., et Baudrit, C. (2008). *Incertitude et environnement - La fin des certitudes scientifiques*, chapitre Représentation et propagation de la connaissance imprécise : ce que les théories de l'incertain peuvent apporter aux sciences environnementales, pages 179–192. Série Ecologie Humaine. Société d'Ecologie Humaine, Aix-En-Provence.
- Meunier, M. (1987). Les études de bassin versant torrentiel. *Cemagref - Informations techniques*, Cahier n°65(n°1) :1–8.
- Meunier, M. (1991). *Eléments d'hydraulique torrentielle*. Etudes Montagne n°1. Cemagref-DICOVA.
- Meunier, M., Ancey, C., et Richard, D. (2004). *L'approche conceptuelle pour l'étude des avalanches*. Cemagref Editions.
- Miller, G. (1994). The magical number seven, plus or minus two : Some limits on our capacity for processing information. *Psychological Review*, 101(2) :343–352.
- Millet, I. and Wedley, W. C. (2002). Modelling risk and uncertainty with the analytic hierarchy process. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, 11(2) :97–107.
- Miralles, A. (2006). *Ingénierie des modèles pour les applications environnementales*. Thèse de doctorat, Université de Montpellier 2.
- Mongin, P. (2003). Le développement durable contre le principe de précaution. *Esprit*, 297 :163–171.
- Monti, S. and Carenini, G. (2000). Dealing with the expert inconsistency in probability elicitation. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 12(4) :499–508.
- Moore, R. (1966). *Interval Analysis*. Prentice Hall, Englewood Cliffs.
- Morin, E. (1988). Le défi de la complexité. *Revue Chimères*, 5-6 :79–94.

- Morin, E. (1999). *Les sept savoirs nécessaires à l'éducation du future*. Unesco, Paris.
- Morley, C. (2002). *Gestion d'un projet système d'information - Principes, techniques, mise en oeuvre et outils*. Dunod, Paris, 3^{ème} édition.
- Morini, S. (2007). Bruno de finetti : l'origine de son subjectivisme. *Journal Electronique d'Histoire des Probabilités et de la Statistique*, Vol.3(n°2, Décembre 2007).
- Mortureux, Y. (2001). *Techniques de l'Ingénieur -Traité "L'entreprise industrielle"*, chapitre La sûreté de fonctionnement : méthodes pour maîtriser les risques - Ref. AG 4 670 - 17 p.
- Munier, B. (1989). Cognition and uncertainty. *Theory and Decision*, 27(1 and 2 july/september 1989) :93–106.
- Mura, R. (1985). Méthodologie de programmation des actions de restauration de terrains en montagne. *B.T.I.*, Vol. 399/401 :265–269.
- Murphy, C. K. (2000). Combining belief functions when evidence conflicts. *Decision Support Systems*, 29(1) :1–9.
- Mustajoki, J., Haimailainen, R., and Salo, A. (2005). Decision support by interval smart/swing - incorporating imprecision in the smart and swing methods. *Decision Sciences*, 36(2) :317–339.
- Ngwenyama, O. K. and Bryson, N. (1998). Generating belief functions from qualitative preferences : An approach to eliciting expert judgments and deriving probability functions. *Data & Knowledge Engineering*, 28(2) :145–159.
- Ngwenyama, O. K. and Bryson, N. (1999). Eliciting and mapping qualitative preferences to numeric rankings in group decision making. *European Journal of Operational Research*, 116(3) :487–497.
- November, V. and Burton-Jeangros, C. (2003). L'apport des sciences sociales dans l'étude du risque. *Annales des Ponts et Chaussees, Ingenieur Science Societe*, pages 4–6.
- November, V. (2006). Risk as a geographical object. *Cahiers de Geographie du Quebec*, 50(141) :289–296.
- November, V. (2008). Spatiality of risk. *Environment and Planning A*, 40(7) :1523–1527.
- Oberkampf, W. L., DeLand, S. M., Rutherford, B. M., Diegert, K. V., and Alvin, K. F. (2002). Error and uncertainty in modeling and simulation. *Reliability Engineering & System Safety*, 75(3) :333–357.
- Oberkampf, W. L., Helton, J. C., Joslyn, C. A., Wojtkiewicz, S. F., and Ferson, S. (2004). Challenge problems : uncertainty in system response given uncertain parameters. *Reliability Engineering & System Safety*, 85(1-3) :11–19.
- Obled, C., Zin, I., Giraud, G., et Durand, Y. (2006). Etude de la réponse hydrologique du sonnant d'uriage :essai de transfert à des bassins voisins. diagnostic et proposition de réseau pluviométrique sur le massif de belledonne. rapport de recherche programme 2006. Rapport technique, Pole Grenoblois de Recherche sur les Risques Naturels, Grenoble.
- O'Hagan, A. and Oakley, J. E. (2004). Probability is perfect, but we can't elicit it perfectly. *Reliability Engineering & System Safety Alternative Representations of Epistemic Uncertainty*, 85(1-3) :239–248.

- Olteanu, A.-M. (2008). *Fusion de connaissances imparfaites pour l'appariement de données géographiques : proposition d'une approche s'appuyant sur la théorie des fonctions de croyance*. PhD thesis, Université Paris-Est.
- Omrani, H., Ion-Boussier, L., and Trigano, P. (2007). A new approach for impacts assessment of urban mobility. *WSEAS Transactions on Information Science and Applications*, 4(3) :439–444.
- OMG (2005). Object management group - unified modelling langage specifications.
- Opricovic, S. and Tzeng, G. H. (2003). Fuzzy multicriteria model for postearthquake land-use planning. *Natural Hazards Review*, 4(2) :59–64.
- Osswald, C. and Martin, A. (2006). Understanding the large family of Dempster-Shafer theory's fusion operators - a decision based measure. In *Proceedings - 9th International Conference on Information Fusion, Florence, Italy. 10-13 July 2006*.
- Ozdemir, M. S. and Saaty, T. L. (2006). The unknown in decision making : What to do about it. *European Journal of Operational Research*, 174(1) :349–359.
- Pan, N. F. (2008). Fuzzy ahp approach for selecting the suitable bridge construction method. *Automation in Construction*, 17(8) :958–965.
- Parsons, S. (2001). *Qualitative approaches for reasoning under uncertainty*. Massachusetts Institute of Technology Press, Cambridge Massachusetts (U.S.A).
- Parsons, J. and Cole, L. (2005). What do the pictures mean? guidelines for experimental evaluation of representation fidelity in diagrammatical conceptual modeling techniques. *Data & Knowledge Engineering*, 55(3) :327–342.
- Peltier, A. (2005). *La gestion des risques naturels dans les montagnes d'Europe occidentale - Etude comparative du Valais (Suisse), de la vallée d'Aoste et des Hautes-Pyrénées (France) - Thèse de doctorat*. PhD thesis, Université Toulouse II Le Mirail - U.F.R. Sciences, espaces, sociétés - Département de géographie et d'aménagement, Toulouse.
- Perillhon, P. (2003). *Techniques de l'Ingénieur - Thème Sécurité et Gestion de l'Environnement - Traité "L'entreprise industrielle"- Ref. SE 4 060*, MOSAR : Présentation de la méthode, page 16.
- Perillhon, P. (2004). *Techniques de l'Ingénieur - Thème Sécurité et Gestion de l'Environnement - Ref. SE 4 061*, chapitre MOSAR : Cas industriel, page 23.
- Peyras, L. (2003). *Diagnostic et analyse de risques liés au vieillissement des barrages - Développement de méthodes d'aide à l'expertise - Thèse de doctorat*. PhD thesis, Université Blaise Pascal - Clermont 2.
- Plattner, T. (2005). Modelling public risk evaluation of natural hazards : a conceptual approach. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 5 :357–366.
- Pigeon, P. (2005). *Géographie critique des risques*. Economica, Paris.
- Pomerol, J.-C. (2006). *Concepts et méthodes pour l'aide à la décision 1 - Outils de modélisation*, Chapitre 4 - La décision humaine : reconnaissance plus raisonnement. Hermès - Lavoisier, Paris.

- Rapin, F., Meunier, M., et Bolognesi, R. (2004). Une nouvelle méthode d'identification des sites à haut risque d'avalanche. *Ingénieries*, (n°39) :43–53.
- Rapin, F., Belanger, L., Hurand, A., and Bernard, J.-M. (2006). Sensitive avalanche paths : using a new method for inventory and classification of risk. In *International Snow Science Workshop Proceedings (ISSW) 2006 - september 30 to october 6*, Telluride - Colorado -Etats-unis -.
- Rapin, F. (2007). Outils de classification des sites à risques d'avalanche - manuel pour le renseignement - ref : Manuel - v 3.1 - 4 avril 2007. Technical report, Cemagref - Unité ETNA (Erosion Torrentielle Neige Avalanches), Grenoble.
- Raufaste, E. and Hilton, D. J. (2006). *Concepts et méthodes pour l'aide à la décision 2 - Risque et incertain*, chapitre 5 - Approche cognitive de la décision humaine. Hermès - Lavoisier, Paris.
- Ravetz, J. (1999). What is post-normal science. *Futures*, pages 647–653.
- Reddy, S. G. (1996). Claims to expert knowledge and the subversion of democracy : The triumph of risk over uncertainty. *Economy and Society*, 25(2) :222–254.
- Renn, O. (2004). *Risk Analysis and Society : An Interdisciplinary Characterization of the Field*, chapter The Challenge of Integrating Deliberation and Expertise : Participation and Discourse in Risk Management, pages 289–366. Cambridge University Press, Cambridge.
- Renn, O. and Graham, P. (2006). Risk governance : towards an integrative approach - white paper n°1. Technical report, IRGC (International Risk Governance Council), Geneva, Switzerland.
- Richard, D. (1995). Les torrents à lave torrentielles dans les départements alpins - situations génératrices - essai de typologie. Technical report, Cemagref -Division Protection contre les érosions - Ministère de l'Environnement - Direction de la Prévention des Pollutions et des Risques.
- Rivière, P. (2005). Les données ne sont pas données : réflexions sur les processus de production d'information. In Hébrail, G. and Sebag, M., editors, *Journée sur la Représentation des Données et des Connaissances - 21 mars 2005 (RDC'05)*, Paris.
- Roqueplo, P. (1997). *Entre savoir et décision, l'expertise scientifique*. Sciences en questions. INRA Editions.
- Rousseaux, F. (2004). *Etude des MNT pour améliorer la fiabilité des calculs d'aléas et de vulnérabilité - Thèse de doctorat*. PhD thesis, Université de Marne-La-Vallée, Marne-La-Vallée.
- Roy, B. (1985). *Méthodologie Multicritère d'Aide à la Décision*. Collection Gestion - Série Production et techniques quantitatives appliquées à la gestion. Economica, Paris.
- Roy, B. (1989). Main sources of inaccurate determination, uncertainty and imprecision in decision models. *Mathematical and Computer Modelling*, 12(10-11) :1245–1254.
- Roy, B. (1993). Decision science or decision-aid science? *European Journal of Operational Research*, 66(2) :184–203.
- Rumbaugh, J., Booch, G., and Jacobson, I. (1999). *The Unified Modelling Language Reference Manual*. Addison-Wesley , Pearson Education, Inc.
- Saaty, T. L. (1982). *Decision-Making for leaders : the analytical hierarchy process for decisions in a complex word*. Life-time learning publications, Belmont, CA, 94002 USA.

- Saaty, T. L. (1994). Highlights and critical points in the theory and application of the analytic hierarchy process. *European Journal of Operational Research*, 74(3) :426–447.
- Saaty, T. L. and Vargas, L. G. (1987). Uncertainty and rank order in the analytic hierarchic process. *European Journal of Operational Research*, 32(1) :107–117.
- Saaty, T. L. (2003). Decision-making with the AHP : Why is the principal eigenvector necessary. *European Journal of Operational Research*, 145(1) :85–91.
- Saaty, T. L. (2005). *MCDA*, volume 78 of *International Series in Operations Research and Management Science*, chapter The Analytic Hierarchy and Analytic Network processes for the measurement of intangible criteria for decision-making, pages 345–407. Springer.
- Saaty, T. L. and Tran, L. T. (2007). On the invalidity of fuzzifying numerical judgments in the analytic hierarchy process. *Mathematical and Computer Modelling*, 46(7-8) :962–975.
- Saaty, T. L. and Shih, H.-S. (2009). Structures in decision making : On the subjective geometry of hierarchies and networks. *European Journal of Operational Research*, 199(3) :867 – 872.
- Sajjad Zahir, M. (1991). Incorporating the uncertainty of decision judgements in the analytic hierarchy process. *European Journal of Operational Research*, 53(2) :206–216.
- Salo, A. A. (1996). On fuzzy ratio comparisons in hierarchical decision models. *Fuzzy Sets and Systems*, 84(1) :21–32.
- Salo, A. A. and Hamalainen, R. P. (1995). Preference programming through approximate ratio comparisons. *European Journal of Operational Research*, 82(3) :458–475.
- Salo, A. and Haimailainen, R. (2001). Preference ratios in multiattribute evaluation (prime)-elicitation and decision procedures under incomplete information. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics Part A :Systems and Humans.*, 31(6) :533–545.
- Saltelli, A., Tarantola, S., Campagnolo, F., and Ratto, M. (2004). *Sensitivity analysis in practice - A guide to Assessing Scientific Models*. John Wiley & Sons, Chichester.
- Saltelli, A. and Saisana, M. (2006). Sensitive issues in the development of composite indicators for policy making. In *Proceedings - Conference Simulation in Industry and Services - December 8, 2006 - Brussels, Belgium*.
- Sasou, K. and Reason, J. (1999). Team errors : definition and taxonomy. *Reliability Engineering & System Safety*, 65(1) :1–9.
- Savage, L. J. (1954). *The Foundations of Statistics*. J. Wiley, New York, USA.
- Shafer, G. (1976). *A mathematical theory of Evidence*. Princeton University Press.
- Schärlig, A. (1985). *Décider sur plusieurs critères - Panorama de l'aide à la décision multicritère*. Diriger l'entreprise. Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, 3 ème edition.
- Schärlig, A. (1996). *Pratiquer Electre et Prométhée - Un complément à Décider sur plusieurs critères*. Diriger l'entreprise. Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, 1 ère edition.
- Sentz, K. and Ferson, S. (2002). Combination of evidence in Dempster-Shafer theory - rapport sand 2002-0835. Technical report, Sandia National Laboratories - United States.

- Slovic, P. (2006). Affect, reason, risk and rationality. *Newsletter of the European Working Group "Multicriteria Aid for Decisions"*, 13(n°13) :1–5.
- Staub, I. (1999). Definition of a debris flow deposit typology and identification of granulometric and geotechnical criteria for debris flow source area materials. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, Vol. 57 :359–367.
- Staub, I. (2001). A methodology for the mapping and analysis of "debris-flow initiation" hazard - application to the bragousse torrent (france). *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, Vol. 59 :319–327.
- Stewart, T. J. (2005b). *Multiple Criteria Decision Analysis : State of the art surveys*, volume 78 of *International Series in Operations Research and Management Science*, chapter 11 - Dealing with uncertainties in MCDA : 445–470. Springer.
- Smets, P. (1991). Varieties of ignorance and the need for well-founded theories. *Information Sciences*, 57-58(C) :135–144.
- Smets, P. and Kennes, R. (1994). The transferable belief model. *Artificial Intelligence*, 66(2) :191–234.
- Smets, P. (1997). *Uncertainty Management in Information Systems. From Needs to Solutions*, chapter Imperfect Information : Imprecision - Uncertainty, pages 225–254. Kluwer Academics Publishers.
- Smith, P. N. (2004). Alternative forms of aggregation in the analytic hierarchy process : Ordered weighted averaging operators. *Journal of Environmental Systems*, 31(1) :49–68.
- Stam, A. and Duarte Silva, A. P. (2003). On multiplicative priority rating methods for the AHP. *European Journal of Operational Research*, 145(1) :92–108.
- Tacnet, J.-M. (2004). Prevention and information related to flood risk management - elements of comparison between systems in France, England and Wales. Technical report, Cemagref - Engref - Environment Agency.
- Tacnet, J.-M., Burnet, R., Ravel, P., Maurel, P., et Lievois, J. (2005a). Systèmes d'information et P.P.R. avalanches : contribution à l'amélioration de la traçabilité des données et des raisonnements - rapport d'étude. Rapport Technique, Cemagref - ONF/RTM - Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable/ Direction de la Prévention des Pollutions et des Risques.
- Tacnet, J.-M., Laigle, D., Berger, F., Dorren, L., et Nedellec, J.-L. (2005b). Expertise des risques naturels gravitaires en montagne et estimation du risque résiduel : un exemple de contribution et des limites actuelles des systèmes d'information. In *Colloque SIRNAT (Systèmes d'information et risques naturels) - 10 et 11 mars 2005*, Montpellier.
- Tacnet, J.-M., Burnet, R., Maurel, P., Libourel, T., and Desconnets, J.-C. (2006a). Data and reasoning processes traceability for risk assesment : application to the french risk prevention plans (PPR) of snow avalanches. In *European Geosciences Union (EGU) - General assembly*, Vienna -3-4 april.
- Tacnet, J.-M., Escande, S., Rapin, F., Burnet, R., and Batton-Hubert, M. (2006). Methodology of snow avalanche post-event field investigations : tools, difficulties and perspectives. In *International Snow Science Workshop Proceedings (ISSW) 2006 - september 30 to october 6*, pp. 530–539, Telluride - Colorado -Etats-unis -.

- Tacnet, J.-M. et Richard, D. (coordinateurs), (2006). Projet de recherche - Appel d'offres Risques Décision Territoires du MEDD - "évaluation et impact de l'incertitude dans le processus d'expertise et de gestion des risques naturels : approche intégrée appliquée à deux risques gravitaires rapides : crues torrentielles et avalanches". Rapport technique, Cemagref.
- Tacnet, J.-M. et Burnet, R. (2007). Projet interreg IIIa prinat - risques naturels - actions 2.2 et 2.3 - organisation de la gestion et de la prévention en France - éléments pour une comparaison transfrontalière - rapport version 1.3. Rapport technique, Cemagref, Grenoble.
- Tacnet, J.-M., Lacroix, E., et Batton-Hubert, M. (2008). *Incertain et environnement - La fin des certitudes scientifiques*, chapitre Risques naturels en montagne : aspects juridiques de l'affichage de l'incertitude dans les expertises, pages 281–291. Série Ecologie Humaine. Société d'Ecologie Humaine, Aix-En-Provence.
- Tacnet, J.-M. et Batton-Hubert, M. (2009). Analyse comparative des méthodes d'aide à la décision pour la détermination des sites sensibles avalanches. Rapport technique, Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement Durable et de l'Aménagement du Territoire (MEEDDAT) - Direction de la Prévention des Pollutions et des Risques - Cemagref.
- Tacnet, J.-M., Batton-Hubert, M., and Dezert, J. (2009). *Advances and applications of DSMT for Information Fusion - Collected works - Volume 3*, chapter Information fusion for natural hazards in mountains : 565–659. American Research Press, Rehoboth, USA.
- Tacnet, J.-M. et Richard, D. (2009). De la conception à la sûreté des barrages de correction torrentielle (in press). *Ingénieries (EAT) Eau Agriculture Territoires*, X :X.
- Thiam, A. (2005). An evidential reasoning approach to land degradation evaluation : Dempster-Shafer theory of evidence. *Transactions in GIS*, 9(4) :507–520.
- Treich, N. (2000). Décision séquentielle et principe de précaution. *Cahiers d'économie et sociologie rurales*, n°55-56 :1–20.
- Tribus, M. (1974). *Décisions rationnelles dans l'incertain*. Masson et Cie, Paris.
- Tsoukias, A. (2006). *Concepts et méthodes pour l'aide à la décision 1 - Outils de modélisation*, chapitre 1 - De la théorie de la décision à l'aide à la décision. Hermès - Lavoisier, Paris.
- Vaidya, O. S. and Kumar, S. (2006). Analytic hierarchy process : An overview of applications. *European Journal of Operational Research*, 169(1) :1–29.
- Vanderpooten, D. et Vallin, D. (2002). *Aide à la décision - Une approche par les cas*. Gestion-Mathématiques-Informatique. Ellipses, Paris.
- Vannoorenberghe, P. (2003). *Information-Interaction-Intelligence*, volume Vol 3 - n°2, chapitre Un état de l'art sur les fonctions de croyance appliquées au traitement de l'information. Editions Cepadue, Toulouse.
- Vansnick, J. C. (1990). *Readings in Multiple Criteria Decision Aid*, chapter Measurement theory and decision aid, pages 81–100. Springer-Verlag, Berlin.
- Veyret, Y. (2004). *Géographie des risques naturels en France - De l'aléa à la gestion*. HATIER, Paris.
- Vinck, D. (2009). De l'objet intermédiaire à l'objet-frontière. vers la prise en compte du travail d'équipement. *Revue d'anthropologie des connaissances*, 3(n°1) :51–72.

- Vincke, P. (1989). *L'aide multicritère à la décision*. Statistiques et mathématiques appliquées. Ellipses, Paris.
- von Neumann, J. and Morgenstern, O. (1944). *Theory of Games and Economic Behavior*. Princeton University Press, Princeton, NJ, USA.
- von Winterfeldt, D. and Fasolo, B. (2009). Structuring decision problems : A case study and reflections for practitioners. *European Journal of Operational Research*, 199(3) :857 – 866.
- Vrijling, J. K., van Hengel, W., and Houben, R. J. (1998). Acceptable risk as a basis for design. *Reliability Engineering & System Safety*, 59(1) :141–150.
- Wadsworth, R. and Hall, J. (2007). Setting site specific critical loads : An approach using endorsement theory and Dempster-Shafer. *Water, Air, and Soil Pollution : Focus*, 7(1-3) :399–405.
- Walliser, B. (1995). Les paradoxes de la décision rationnelle. *Annales de Ponts et Chaussées*, (n° 76).
- Wand, Y., Monarchi, D. E., Parsons, J., and Woo, C. C. (1995). Theoretical foundations for conceptual modelling in information systems development. *Decision Support Systems*, 15(4) :285–304.
- Wang, J., Yang, J. B., and Sen, P. (1996). Multi-person and multi-attribute design evaluations using evidential reasoning based on subjective safety and cost analyses. *Reliability Engineering and System Safety*, 52(2) :113–128.
- Wang, Y. M., Yang, J. B., and Xu, D. L. (2006a). Environmental impact assessment using the evidential reasoning approach. *European Journal of Operational Research*, 174(3) :1885–1913.
- Wang, Y. M., Yang, J. B., Xu, D. L., and Chin, K. S. (2006b). The evidential reasoning approach for multiple attribute decision analysis using interval belief degrees. *European Journal of Operational Research*, 175(1) :35–66.
- Weichselgartner, J. and Obersteiner, M. (2002). Knowing sufficient and applying more : challenges in hazards management. *Global Environmental Change Part B : Environmental Hazards*, 4(2-3) :73–77.
- Wheaton, K. J. and Chido, D. E. (2006). Structured analysis of competing hypotheses. improving a tested intelligence methodology. *Competitive Intelligence Magazine (available on-line www.scip.org)*, 9(6 - November-December 2006) :12–15.
- White, G. F., Kates, R. W., and Burton, I. (2001). Knowing better and losing even more : the use of knowledge in hazards management. *Global Environmental Change Part B : Environmental Hazards*, 3(3-4) :81–92.
- Winter, S. (1975). *Adaptive Economic Models*, chapter Optimization and Evolution in the Theory of The Firm. Academic Press, New-York.
- Wong, S., Yao, Y., and Lingras, P. (1993). Comparative beliefs and their measurements. *International Journal of General Systems*, 22(1) :69–89.
- Wong, S. and Lingras, P. (1994). Representation of qualitative user preference by quantitative belief functions. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 6(1) :72–78.

- Woo, G. (1999). *The mathematics of natural catastrophes*. Imperial College Press, London, 2000 edition.
- Xu, Z. and Chen, J. (2008). Some models for deriving the priority weights from interval fuzzy preference relations. *European Journal of Operational Research*, 184(1) :266–280.
- Yager, R. (1987). On the Dempster-Shafer framework and new combination rules. *Information Sciences*, 41(2) :93–137.
- Yager, R. (1988). On ordered weighted averaging operators in multi-criteria decision making. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 18 :183–190.
- Yager, R. (2008). Decision making under Dempster-Shafer uncertainties. *Studies in Fuzziness and Soft Computing*, 219 :619–632.
- Yang, J.-B. and Singh, M. G. (1994). An evidential reasoning approach for multiple-attribute decision making with uncertainty. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 24(1) :1–18.
- Yang, J.-B. and Sen, P. (1994). A general multi-level evaluation process for hybrid MADM with uncertainty. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 24(10) :1458–1473.
- Yang, J. B. (2001). Rule and utility based evidential reasoning approach for multiattribute decision analysis under uncertainties. *European Journal of Operational Research*, 131(1) :31–61.
- Yang, J. B. and Xu, D. L. (2002). On the evidential reasoning algorithm for multiple attribute decision analysis under uncertainty. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics Part A :Systems and Humans.*, 32(3) :289–304.
- Yang, J. B., Wang, Y. M., Xu, D. L., and Chin, K. S. (2006). The evidential reasoning approach for mada under both probabilistic and fuzzy uncertainties. *European Journal of Operational Research*, 171(1) :309–343.
- Yang, S.-L. and Fu, C. (2009). Constructing confidence belief functions from one expert. *Expert Systems with Applications*, 36(4) :8537–8548.
- Zadeh, L. (1965). Fuzzy sets. *Information and Control*, 8 :338–353.
- Zadeh, L. A. (1978). Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility. *Fuzzy Sets and Systems*, 1 :3–28.
- Zadeh, L. A. (1986). Simple view of the Dempster-Shafer theory of evidence and its implication for the rule of combination. *AI Magazine*, 7(2) :85–90.
- Zanakis, S. H., Solomon, A., Wishart, N., and Dublish, S. (1998). Multi-attribute decision making : A simulation comparison of select methods. *European Journal of Operational Research*, 107(3) :507–529.

Table des figures

1.1	Plan de la thèse	17
2.1	Exemples de phénomènes de crues torrentielles et d’avalanches et de leurs conséquences	22
2.2	Analogie des zones fonctionnelles et phases temporelles des phénomènes gravitaires rapides	22
2.3	Bassin versant torrentiel schématique	23
2.4	Phénomènes torrentiels et disciplines scientifiques (d’après (Meunier, 1991)) . . .	24
2.5	Exemple de types et caractéristiques d’avalanche de neige	25
2.6	Diagramme fréquence-gravité : Risques acceptables, effets de la prévention et de la protection	27
2.7	Plusieurs présentations pour le même concept de risque	27
2.8	Détermination du niveau de risque par combinaison de classes qualitatives	28
2.9	Décomposition détaillée du concept de risque	29
2.10	Cercle de la gestion des risques	30
2.11	Dimension spatiale et temporelle de la gestion du risque : exemple du modèle ”source - zone de propagation - récepteur”	30
2.12	Les moyens de réduction du risque	31
2.13	Les concepts de prévention, protection et mitigation	31
2.14	Actions de prévention et de mitigation : l’exemple des risques de crues torrentielles et d’avalanches	32
2.15	Les niveaux d’incision du chenal d’écoulement en partie haute et médiane du chenal d’écoulement n’étaient pas prévus	35
2.16	De mauvaises conditions d’observation compromettent l’estimation du volume de neige au départ de l’avalanche	36
2.17	Un premier principe de prise en compte de la qualité de l’information dans l’expertise	37
2.18	Comment considérer des expertises contradictoires ?	38
2.19	L’expertise est nécessaire pour interpréter les simulations et proposer une solution opérationnelle. Le cercle est un simple point de repère)	39
2.20	L’incertitude provient des différentes phases de l’expertise	40
2.21	Les plans de prévention des risques (PPR) : une mesure non-structurale de zonage des risques	41
2.22	Les différents types d’expertise	42
2.23	Principe de la méthode de classification des Sites Sensibles Avalanches (<i>SSA</i>) . .	45
2.24	Exemple de classes d’évaluation de critères morphologiques - extrait partiel . . .	45
2.25	Grille d’analyse du niveau d’aléa torrentiel (MEEDDAT, 2009)	47
2.26	Arbre de choix de l’emprise du phénomène torrentiel de référence (MEEDDAT, 2009)	48
2.27	L’expertise : un processus multi-sources exploitant des informations variées et hétérogènes	49

TABLE DES FIGURES

2.28	Science appliquée, expertise et science "post-normale"	51
2.29	L'information et la traçabilité sont au cœur de la démarche <i>PPR</i>	53
2.30	Exigences de traçabilité selon la norme NF X 50-110 (AFNOR, 2003)	54
2.31	Exemples d'éléments de raisonnement d'un magistrat dans un contentieux relatif aux risques naturels	55
2.32	Critères d'appréciation de la qualité d'une expertise par le juge	55
2.33	La gestion intégrée et durable du risque (ISDR, 2004)	58
2.34	Approche intégrée globale et expertise technique collective	59
2.35	La problématique comprend quatre objectifs centrés sur les liens entre information et décision	64
3.1	La décision dépend des connaissances et des préférences	69
3.2	L'imperfection de l'information conditionne la décision	70
3.3	La qualité de l'information impacte l'évaluation des composantes du risque . . .	73
3.4	Processus d'expertise et cycle d'information	74
3.5	Représentation de processus de raisonnement par un diagramme de PERT spatialisé	75
3.6	Arbres d'évènement, de causes et défaillance	76
3.7	Exemple de diagramme <i>UML</i> : packages	78
3.8	Utilisation des méta-données en lien avec des référentiels sémantiques et spatiaux	79
3.9	Proposition de méta-données relatives à la généalogie des données	80
3.10	Les méta-données, porteuses de l'imperfection et de la généalogie de l'information	80
4.1	Comparaison des contextes de décision en univers certain, risqué et incertain . .	86
4.2	Trois problématiques d'aide multicritères à la décision : choisir, ranger, trier . . .	90
4.3	Seuils d'indifférence et de préférence définissant un pseudo-critère d'après (Van- derpooten et Vallin, 2002)	93
4.4	Principe de la théorie <i>MAUT</i> (Multi-attribute utility theory)	95
4.5	Analyse et synthèse au travers de l' <i>AHP</i>	98
4.6	Echelle verbale des préférences de l' <i>AHP</i>	100
4.7	Matrice de préférences <i>AHP</i>	100
4.8	Méthode <i>AHP</i> - Normalisation de la matrice de préférences et calcul du vecteur de pondération	101
4.9	Normalisation de la matrice de préférences et calcul du vecteur de pondération : exemple d'application numérique	102
4.10	Méthode <i>AHP</i> : signification de la cohérence moyenne	102
4.11	Indices et ratio de cohérence : exemple numérique	103
4.12	Evaluation selon le principe <i>critère-solution</i> : méthode <i>AHP</i> originale	103
4.13	Evaluation selon le principe <i>critère-estimateur-solution</i>	104
4.14	Contributions des approches multicritères aux objectifs de la thèse	107
4.15	Le diagnostic et la reconfiguration de modèles de décision est un premier déve- loppement de la thèse	108
5.1	Définition d'un sous-ensemble flou	112
5.2	Représentation d'une variable linguistique par un sous-ensemble flou	113
5.3	Mesures de possibilité et de nécessité issues d'une distribution de possibilité . .	114
5.4	Approche hybride : les distributions de probabilités sont remplacées par des dis- tributions de possibilités	116
5.5	Modèles de Shafer, hybride et libres dans le cadre de la <i>DST</i> et la <i>DSmT</i>	122
5.6	Deux modélisations du problème dans le cadre de la <i>DST</i> ou de la <i>DSmT</i>	123
5.7	Principales difficultés liées à la fusion d'information	125

TABLE DES FIGURES

5.8	Positionnement des théories des probabilités, possibilités et fonctions de croyance - source (Bouchon-Meunier, 1995), p. 89	127
5.9	Contributions des "nouvelles" théories formelles de l'incertain et de l'imprécis aux objectifs de la thèse	129
6.1	Positionnement du chapitre n°6 : Vers une méthodologie associant l'aide multicri- tères à la décision et les théories de l'information imparfaite	132
6.2	Différence entre les contextes de fusion d'information et d'agrégation de préférences	136
6.3	Une nouvelle méthodologie <i>ER-MCDA</i> sera développée au chapitre 8	138
7.1	Comment combiner les composantes du risque ?	141
7.2	Evaluation de sites dans un modèle fictif	142
7.3	Deux modèles de préférences associés à l'évaluation du niveau de risque	143
7.4	Résultats de l'évaluation des sites selon les deux modèles de préférences	143
7.5	Méthode Sites Sensibles Avalanches : exemple de résultats d'évaluation	145
7.6	Méthode Sites Sensibles Avalanches : Analyse de résultats d'évaluation	145
7.7	Principes des modèles "à plat" et hiérarchiques	147
7.8	Problématique n°1 : structurer un problème sous une forme hiérarchique	147
7.9	Problématique n°2 : normaliser les poids de critères et les agréger	148
7.10	Problématique n°3 : reconfigurer, changer la hiérarchie sans modifier le résultat d'évaluation	148
7.11	La structuration d'un modèle hiérarchique correspond à une vision du problème de décision : il peut y en avoir différentes variantes	149
7.12	Modèle d'évaluation : critère-alternative (standard) et critère-estimateur-solution	150
7.13	Composants (hiérarchiques) unitaires d'un modèle hiérarchique	151
7.14	Vecteurs d'identification des critères	152
7.15	Etapes de normalisation des poids absolus affectés aux classes d'évaluation	154
7.16	Rétro-ingénierie de modèles hiérarchiques : principe du modèle de normalisation <i>Somme(S)</i>	155
7.17	Rétro-ingénierie de modèles hiérarchiques : principe du modèle de normalisation <i>Maximum(M)</i>	157
7.18	Rétro-ingénierie de modèles hiérarchiques : principe du modèle de normalisation <i>SommeMaximum(SM)</i>	158
7.19	Rétro-ingénierie de modèles hiérarchiques : principe du modèle de normalisation <i>SommeMaximumFeuille(SML)</i>	160
7.20	Modèles de décision "à plat" et hiérarchique	163
7.21	Circuit de reconfiguration d'un arbre hiérarchique	163
7.22	Première étape : choix et mise en œuvre d'un principe de normalisation sur un modèle "à plat"	164
7.23	Deuxième étape : reconfiguration et calcul des poids normalisés agrégés dans le modèle hiérarchique	165
7.24	Modèle "à plat" de référence	166
7.25	Modèle "à plat" de référence : exemple d'application numérique	166
7.26	Modèle "à plat" reconfiguré dans la structure hiérarchique A	167
7.27	Modèle "à plat" reconfiguré dans la structure hiérarchique A : exemple d'applica- tion numérique	168
7.28	Modèle "à plat" reconfiguré dans la structure hiérarchique B : exemple d'applica- tion numérique	168
7.29	Description du critère habitants - occupants hivernaux : extrait du manuel de la méthode "Sites Sensibles Avalanches"	170

TABLE DES FIGURES

7.30	Structuration hiérarchique de la méthode "Sites Sensibles Avalanches" : exemple du critère habitants - occupants hivernaux	170
7.31	Reconfiguration hiérarchique de la méthode "Sites Sensibles Avalanches" et explicitation de scénarios	171
7.32	Principe de l'évaluation d'une alternative dans le modèle critère-estimateur-solution	172
7.33	Résultats pour les deux sites tests n°1 et n°2	172
7.34	Détail du calcul des poids agrégés normalisés pour le critère habitants occupants hivernaux	173
7.35	Détail du calcul des poids agrégés normalisés pour le critère habitants occupants hivernaux	174
7.36	Analyse en retour des préférences entre critères principaux de la méthode "Sites Sensibles Avalanches" : comparaison avec les objectifs initiaux	175
7.37	Analyse en retour des préférences entre critères principaux de la méthode "Sites Sensibles Avalanches" : comparaison avec le modèle réel	176
8.1	La méthodologie <i>ER-MCDA</i> comprend 5 étapes principales	182
8.2	Modélisation <i>UML</i> des packages principaux de l'approche <i>ER-MCDA</i>	183
8.3	Modélisation <i>UML</i> de la structure hiérarchique	184
8.4	Le cadre de discernement commun de décision est au centre de la méthodologie <i>ER-MCDA</i>	185
8.5	Cadre de discernement dans le cadre des modèles de transposition basés sur les théories <i>DST</i> et <i>DSmT</i> - Les numéros sont des codifications d'éléments de l'hyperpowerset	186
8.6	Passage de mesures de nécessité à des mesures de possibilité	188
8.7	Passage de mesures de possibilité à des masses de croyance	188
8.8	Exemple numérique : Passage de mesures de nécessité à des masses de croyance .	189
8.9	Relations entre mesures de nécessité et de possibilité d'après (Baudrit et al., 2005b)	189
8.10	Principe et modèles de transposition quantitative	190
8.11	Nombre flou	191
8.12	Intervalle flou $L - R$	191
8.13	Modèle et principe de transposition quantitative dans le cadre de la <i>DST</i>	192
8.14	Modèle et principe de transposition quantitative dans le cadre de la <i>DSmT</i> . . .	192
8.15	Définition de jeu de masse de croyance à partir de l'évaluation d'un critère quantitatif	193
8.16	Transposition quantitative : Cas d'une source totalement fiable, évaluation par un intervalle imprécis	195
8.17	Transposition quantitative : Cas d'une source totalement fiable, évaluation par deux intervalles imprécis emboîtés	196
8.18	Transposition quantitative : Cas d'une source totalement fiable, évaluation par deux intervalles imprécis emboîtés - intervalle 1	197
8.19	Transposition quantitative : Cas d'une source totalement fiable, évaluation par deux intervalles imprécis emboîtés - intervalle 2	198
8.20	Transposition quantitative : Cas d'une source partiellement fiable, évaluation par un intervalle imprécis	199
8.21	Transposition quantitative : Cas d'une source partiellement fiable, évaluation par une valeur précise	200
8.22	Récapitulatif des phases du processus de transposition quantitative	201
8.23	Etapes des processus d'évaluation et de transposition qualitatives vers le cadre de discernement commun (de décision)	203
8.24	Définition du cadre de discernement du modèle d'évaluation qualitative dans le contexte de la <i>DST</i> et de la <i>DSmT</i> sous forme d'un diagramme de <i>Venn</i>	204

TABLE DES FIGURES

8.25	Définition des indices de confiance minimum, maximum et moyen associé à l'évaluation d'un élément	206
8.26	Définition de l'intervalle d'évaluation qualitative	207
8.27	Stratégies de fusion	208
8.28	Est-ce que le processus de fusion doit suivre le modèle de décision (cas de plusieurs sources) ?	209
8.29	Description détaillé du processus de fusion implémenté	210
8.30	Mise en œuvre des facteurs d'affaiblissement à deux niveaux de fusion dans l'approche <i>ER-MCDA</i>	211
8.31	Deux méthodes pour passer des préférences (poids) à un facteur d'affaiblissement	212
8.32	Modèles <i>DST</i> et <i>DSmT</i> pour les cas de test du facteur d'affaiblissement d'importance	213
8.33	Cas test : fiabilité et importance des sources (critères) c_1 and c_2	214
8.34	Résultats des méthodes d'affaiblissement des sources : <i>fiabilité-fiabilité</i>	216
9.1	Contextes de décision et d'application simplifiés : définition de l'exposition d'un site au risque d'avalanche	224
9.2	Modèle hiérarchique simplifié d'analyse de la sensibilité au risque d'avalanche	225
9.3	Vision à plat du modèle simplifié d'analyse de la sensibilité au risque d'avalanche	227
9.4	Passage du poids agrégé normalisé (<i>SommeMax</i>) au facteur d'affaiblissement d'importance - critère C_{111}	228
9.5	Implémentation informatique et codification des données du modèle hiérarchique multicritères	228
9.6	Facteurs d'affaiblissement pour la fusion des critères déduits des poids normalisés	229
9.7	Passage des mesures de possibilités aux masses des intervalles d'évaluation - critère $C_{[111]}$	230
9.8	Passage d'un intervalle d'évaluation à la masse transposée par calcul d'un ratio surfacique - Modèle de transposition <i>DST</i> - critère $C_{[111]}$	231
9.9	Jeu complet de masses transposées d'une évaluation - critère $C_{[111]}$ - Modèle de transposition <i>DST</i>	232
9.10	Passage d'un intervalle d'évaluation à la masse transposée par calcul d'un ratio surfacique - critère $C_{[111]}$ - Modèle de transposition <i>DSmT</i>	233
9.11	Deux modèles d'évaluation qualitative du critère "Infrastructures" $C_{[112]}$	237
9.12	Comparaison des pondérations (équivalentes) entre le modèle simplifié et le modèle ER-MCDA	238
9.13	Détermination des masses de croyance et crédibilités des éléments - Critère qualitatif $C_{[112]}$ - Modèle d'évaluation <i>DST</i>	238
9.14	Indices de confiance et intervalle d'évaluation qualitative du critère $C_{[112]}$ - Cadre <i>DST</i> - sources 1 et 2	240
9.15	Modèle de transposition (<i>DST</i>) qualitatif du critère $C_{[112]}$ et intervalles d'évaluation (<i>DST</i>) des sources 1 et 2	241
9.16	Détermination des masses de croyance et crédibilités des éléments - Critère qualitatif $C_{[112]}$ - Modèle d'évaluation <i>DSmT</i>	242
9.17	Crédibilités des regroupements d'éléments pour construire le modèle de transposition - Critère qualitatif $C_{[112]}$ - Modèle d'évaluation <i>DSmT</i>	242
9.18	Indices de confiance et intervalle d'évaluation qualitative du critère $C_{[112]}$ - Cadre <i>DSmT</i> - sources 1 et 2	243
9.19	Modèle de transposition (<i>DST</i>) qualitatif du critère $C_{[112]}$ et intervalles d'évaluation (<i>DSmT</i>) des sources 1 et 2	244
9.20	Description des processus de fusion n°1, 3, 7 et 9	245

TABLE DES FIGURES

9.21 Synthèse graphique des résultats (bba) des processus de fusion n°1,3,7 et 9	249
9.22 Méthodologie <i>ER – MCDA</i> - Description du processus de fusion par un diagramme de classes <i>UML</i>	250
9.23 Cadre de fusion d'information dans le contexte de zonage des risques	253
9.24 Principe de la fusion des composantes du risque avec une composante spatiale . .	254
10.1 Les deux volets de développements	258
10.2 Apports de la thèse : aspects méthodologiques et opérationnels	259
10.3 Contribution aux objectifs du volet Diagnostic et reconfiguration hiérarchique . .	260
10.4 Contribution aux objectifs du volet relatif à l'association de l'analyse multicritères et de la fusion d'information	263
10.5 Dissocier l'évaluation et la décision	267
10.6 Principe d'un modèle de transposition quantitatif multi-sources	271
10.7 La démarche ER-MCDA idéale ? Fusion au niveau de l'évaluation des critères, analyse multicritères hiérarchique pour la formalisation du problème et sur-classement pour la décision	274
10.8 Projet d'analyse de la perception de l'incertitude dans le processus de gestion des risques	281
10.9 Perspectives méthodologiques et opérationnelles de la thèse	282
11.1 Une réponse mais aussi des questionnements dans l'objectif d'une gestion intégrée	296
11.2 Le cadre de gestion intégrée du risque (Renn and Graham, 2006)	297
11.3 Une méthodologie à l'interface entre l'analyse, l'évaluation et la gestion des risques	298
B.1 Composants de l'expertise dans le cadre de la réalisation d'un Plan de prévention des risques (<i>PPR</i>) avalanches	331
B.2 Amélioration de la traçabilité des raisonnements dans le cadre des plans de prévention des risques (<i>PPR</i>) avalanches : description des flux d'information	332
B.3 Modèle global du cadre d'analyse des risques naturels gravitaires rapides (Pseudo-ontologie)	333
B.4 Modèle global du cadre d'analyse du domaine écoulement torrentiel (Pseudo-ontologie)	334
B.5 Stratégies de correction torrentielle active et passive (Tacnet et Richard, 2009) .	335
B.6 Rôle des barrages de correction torrentielle dits de "consolidation" (Tacnet et Richard, 2009)	335
B.7 Exemples de barrages de consolidation et de sédimentation (Tacnet et Richard, 2009)	336
B.8 Exemple de décision : choix d'une stratégie de protection	336
B.9 Sources d'incertitude dans l'analyse d'un bassin versant torrentiel	337
B.10 Eléments du raisonnement d'expertise du charriage torrentiel	338
C.1 Taxonomie de l'incertitude et des imperfections de l'information (d'après Smets)	339
C.2 Taxonomie de l'incertitude et des imperfections de l'information (d'après Smithson)	340
C.3 Taxonomie de l'incertitude et des imperfections de l'information (d'après Bonisone)	340
D.1 Un exemple de difficulté de compréhension des probabilités	341
D.2 Utilité subjective dans la théorie des perspectives source (Raufaste and Hilton, 2006) p.143	343
E.1 Historique de l'évolution de la théorie de la décision classique	350
F.1 Histoire des "nouvelles" théories de l'incertain	351

TABLE DES FIGURES

F.2	Représentation paramétrique d'un nombre flou (triangulaire)	352
F.3	Représentation paramétrique d'un intervalle flou (trapézoïdal)	353
F.4	Méthodologie de mise en œuvre de la théorie de <i>Dezert-Smarandache</i> (<i>DSmT</i>) - (Dezert and Smarandache, 2004)	360
G.1	Implémentation de la normalisation dans le modèle original <i>AHP</i>	364
G.2	Implémentation de la normalisation dans le modèle (<i>S</i>) <i>Somme</i>	365
G.3	Implémentation de la normalisation dans le modèle (<i>M</i>) <i>Maximum</i>	366
G.4	Implémentation de la normalisation dans le modèle (<i>SM</i>) <i>Somme-Maximum</i>	367
G.5	Implémentation de la normalisation dans le modèle (<i>SML</i>) <i>Somme-MaximumFeuille</i>	368
G.6	Arbre hiérarchique simplifié correspondant au modèle fictif (ou simplifié) n° 1	369
G.7	Application numérique des modèles de normalisation <i>S</i> , <i>M</i> , <i>SM</i> , <i>SML</i> au modèle fictif (ou simplifié) n° 1	370
G.8	Arbre hiérarchique simplifié correspondant au modèle fictif (ou simplifié) n° 1	371
G.9	Arbre hiérarchique simplifié correspondant au modèle fictif (ou simplifié) n° 2	372
G.10	Modèle "à plat" correspondant au modèle fictif (ou simplifié) n° 2	373
G.11	Modèle hiérarchique normalisé correspondant au modèle fictif (ou simplifié) n° 2	374
G.12	Principe et détail du calcul de normalisation selon le modèle SommeMax - modèle fictif (ou simplifié) n° 2	375
G.13	Implémentation du calcul de normalisation selon le modèle SommeMax - modèle fictif (ou simplifié) n° 2 - critères <i>C1111</i> et <i>C111</i>	376
G.14	Implémentation du calcul de normalisation selon le modèle SommeMax - modèle fictif (ou simplifié) n° 2 - critères <i>C1</i> et <i>C11</i>	377
H.1	Sites sensibles avalanches version actuelle - Vulnérabilité partie 1/2	380
H.2	Sites sensibles avalanches version actuelle - Vulnérabilité partie 2/2	381
H.3	Sites sensibles avalanches version actuelle - Morphologie	382
H.4	Sites sensibles avalanches version actuelle - Histoire et Nivo-météorologie	383
H.5	Sites sensibles avalanches approche par scénarios - Vulnérabilité partie 1/2	385
H.6	Sites sensibles avalanches approche par scénarios - Vulnérabilité partie 2/2	386
H.7	Sites sensibles avalanches approche par scénarios - Morphologie	387
H.8	Sites sensibles avalanches approche par scénarios - Histoire et nivo-météorologie	388
I.1	Modèle de transposition (<i>DST</i>) qualitatif du critère $C_{[121]}$ (Morphologie) et in- tervalles d'évaluation (<i>DST</i>) des sources 1 et 2	389
I.2	Modèle de transposition (<i>DST</i>) qualitatif du critère $C_{[122]}$ (Histoire) et intervalles d'évaluation (<i>DST</i>) des sources 1 et 2	390
I.3	Modèle de transposition (<i>DST</i>) qualitatif du critère $C_{[123]}$ (Nivo-climatologie) et intervalles d'évaluation (<i>DST</i>) des sources 1 et 2	390
I.4	Fusion des jeux de masses de croyances d'évaluation transposées - Critère $C_{[111]}$ - Cadre <i>DSmT</i> - Détail des résultats du prototype	391
I.5	Synthèse des hypothèses des processus de fusion basés un modèle de transposition <i>DST</i>	393
I.6	Synthèse des hypothèses des processus de fusion basés sur un modèle de transpo- sition <i>DSmT</i>	394
I.7	Critère racine (Décision) $C_{[1]}$ - Processus de fusion n°7 - Structures de données pour affichage des résultats	395
I.8	Structures de données du modèle <i>ER-MCDA</i>	396
I.9	Critère $C_{[111]}$ (Occupants hivernaux) - Processus de fusion n°7 - Modèle de trans- position <i>DSmT</i> - Structures de données pour transposition des évaluations quan- titatives	397

Liste des tableaux

5.1	Exemple d'affaiblissement d'une source \mathcal{B} - Facteur d'affaiblissement $\alpha_s = 0.5$ - $Card(\Theta) = 2$	119
5.2	Tableau masses de croyances - $Card(\Theta) = 2$	123
5.3	Résultat de la fusion - Règle de Dempster - modèle de <i>Shafer</i>	124
5.4	Résultat de la fusion - Règle <i>DSmC</i> - modèle libre <i>DSm</i>	124
8.1	Approche <i>ER-MCDA</i> - double affaiblissement (fiabilité) des critères c_1 et c_2 - cadre <i>DST</i> - Modèle de <i>Shafer</i>	215
8.2	Approche <i>ER-MCDA</i> - double affaiblissement (fiabilité) des critères c_1 et c_2 - cadre <i>DSmT</i> - Modèle libre	216
8.3	Approche <i>ER-MCDA</i> - double affaiblissement (Fiabilité puis Importance) des critères c_1 et c_2 - cadre <i>DST</i> - Modèle de <i>Shafer</i>	217
8.4	Approche <i>ER-MCDA</i> - double affaiblissement (Fiabilité puis Importance) des critères c_1 et c_2 - cadre <i>DSmT</i> - Modèle libre	218
9.1	Critère $C_{[111]}$ - Source 1 - Evaluation n°1 - Mesures de nécessité et masses de croyance (bba)	230
9.2	Jeu de masses de croyance transposées (bba)- Critère $C_{[111]}$ - Source 1 - Evaluation 1 - Modèle de transposition <i>DST</i>	231
9.3	Masses de croyance (bba) avant et après affaiblissement (fiabilité) - Critère $C_{[111]}$ - Source 1 - Evaluation 1 - Modèle de transposition <i>DST</i>	232
9.4	Transposition des intervalles d'évaluation en jeu de masses de croyance (bba)- Critère $C_{[111]}$ - Source 1 - Evaluation 1 - Modèle de transposition <i>DSmT</i>	233
9.5	Jeu de masses (bba) avant et après affaiblissement (fiabilité)- Critère $C_{[111]}$ - Source 1 - Evaluation n°1 - Modèle de transposition ("mapping") <i>DSmT</i>	234
9.6	Fusion des jeux de masses de croyances d'évaluation transposées - Critère $C_{[111]}$ - Sources d'évaluation non affaiblies - Modèle de transposition <i>DST</i> - Ordre de fusion (\oplus Critère(\oplus Source-Evaluation))	234
9.7	Fusion des jeux de masses de croyances d'évaluation transposées - Critère $C_{[111]}$ - Sources d'évaluation affaiblies - Modèle de transposition <i>DST</i> - Ordre de fusion (\oplus Critère(\oplus Source-Evaluation))	235
9.8	Fusion des jeux de masses de croyances d'évaluation transposées - Critère $C_{[111]}$ - Sources d'évaluation non affaiblies - Modèle de transposition <i>DSmT</i> - Ordre de fusion (\oplus Critère(\oplus Source-Evaluation))	236
9.9	Crédibilité des singletons et de leurs regroupements (unions) - Critère qualitatif $C_{[112]}$ - Modèle d'évaluation <i>DST</i>	239
9.10	Jeu de masses de croyances (bba)- Critère de décision $C_{[1]}$ - Processus de fusion n° 1 - Critères terminaux affaiblis- Sources d'évaluation affaiblies - Ordre de fusion (\oplus Critère(\oplus Source-Evaluation)) - modèle de transposition <i>DST</i> - modèle d'évaluation qualitative <i>DST</i>	246

LISTE DES TABLEAUX

9.11	Jeu de masses de croyances (bba)- Critère de décision $C_{[1]}$ - Processus de fusion n° 3 - Critères terminaux affaiblis - Sources d'évaluation affaiblies -Ordre de fusion (\oplus Critère(\oplus Source-Evaluation)) - modèle de transposition DST - modèle d'évaluation qualitative DST	246
9.12	Jeu de masses de croyances (bba)- Critère de décision $C_{[1]}$ - Processus de fusion n° 7 - Critères terminaux affaiblis - Sources d'évaluation affaiblies - Cadre $DSmT$ - Ordre de fusion (\oplus Critère(\oplus Source-Evaluation)) - modèle de transposition $DSmT$ - modèle d'évaluation qualitative DST	247
9.13	Jeu de masses de croyances (bba)- Critère de décision $C_{[1]}$ - Processus de fusion n° 9 - Critères terminaux affaiblis - Sources d'évaluation affaiblies - Cadre $DSmT$ - Ordre de fusion (\oplus Critère(\oplus Source-Evaluation)) - $DSmT$ modèle de transposition - DST modèle d'évaluation qualitative	248
A.1	Sigles et abréviations organismes	328
A.2	Dispositifs dédiés à la gestion des risques	328
A.3	Modélisation conceptuelle	329
A.4	Sigles et abréviations relatifs aux théories des fonctions de croyance	329
A.5	Sigles et abréviations relatifs aux méthodes d'aide multi-critères à la décision	329
A.6	Sûreté de fonctionnement	330
D.1	Glossaire : modèles	345
F.1	Tableau masses de croyances - Exemple de Zadeh - $Card(\Theta) = 3$	355
F.2	Tableau masses de croyances avant fusion - 3 sources - $Card(\Theta) = 2$	356
F.3	Masses de croyances après l'étape n°1 : fusion conjonctive de m_1 et m_2	356
F.4	Données masses de croyances de l'étape n°2 : fusion conjonctive de m_{12} et m_3	357

Annexes

Annexe A

Abréviations-Symbôles

A.1 Domaine thématique des risques naturels

A.1.1 Organismes

Cemagref	Institut de recherche pour l'ingénierie de l'agriculture et de l'environnement (www.cemagref.fr)
MEEDDM	Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement Durable et de la Mer
DGPR	Direction Générale de la Prévention des Risques (MEEDDM)
ONF	Office National des Forêts
RTM	(Service, politique de) Restauration des Terrains en Montagne
BRGM	Bureau de Recherches Géologiques et Minières
Cete/LRPC	Centre d'études techniques de l'Équipement/Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées

TABLE A.1 – Sigles et abréviations organismes

A.1.2 Gestion des risques naturels

EPA	Enquête permanente sur les avalanches (www.avalanches.fr)
CLPA	Carte de localisation des phénomènes d'avalanches
SSA	Sites sensibles avalanches
PPR	Plan de Prévention des Risques (prévisibles)

TABLE A.2 – Dispositifs dédiés à la gestion des risques

A.2 Symboles-notations

A.2.1 Modélisation conceptuelle

UML	Unified modelling langage
OWL	Ontology web langage
PERT	(Diagramme) Program (or project) Evaluation Review Technique (inventé par la société Booz-Allen-Hamilton en 1956)
GANTT	Diagramme de Gantt (du nom de son inventeur, Henry-Lawrence Gantt en 1910)

TABLE A.3 – Modélisation conceptuelle

A.2.2 Théories de l'incertain

Théorie de l'évidence

DST	Théorie de Dempster-Shafer (Dempster-Shafer Theory) ou Théorie des fonctions de croyance, de l'évidence
DSmT	Théorie de Dezert-Smarandache (Dezert-Smarandache Theory) ou théorie du raisonnement plausible et paradoxal
TBM	Modèle des croyances transférables (Transferable Belief Model)
ER	Raisonnement crédibiliste (Evidential Reasoning)
<i>bba</i>	masse de croyance ou jeu de masse de croyance (basic belief assignment)
<i>Bel</i>	crédibilité (Belief)
<i>Pl</i>	Plausibilité (Plausibility)
<i>BetP</i>	Probabilité pignistique (Pignistic probability)
<i>PCR</i>	Règle de redistribution proportionnelle du conflit (Proportional Conflict Redistribution Rule)

TABLE A.4 – Sigles et abréviations relatifs aux théories des fonctions de croyance

Théorie des possibilités

A.2.3 Méthodes d'aide multi-critères à la décision

AMC	Analyse multi-critères
AHP	Analytic Hierarchy Process (MHM en français)
MHM	Méthode hiérarchique multi-critères (<i>AHP</i> en anglais)
Electre	ELimination et Choix Traduisant la REalité
MCDA	Multicriteria Decision Analysis (Analyse de la décision multi-critères)
MAUT	Multi Attribute Utility Theory (Théorie de l'utilité multi-attribut)

TABLE A.5 – Sigles et abréviations relatifs aux méthodes d'aide multi-critères à la décision

A.2.4 Sûreté de fonctionnement

SdF	Sûreté de fonctionnement
AMDE	Analyse des Modes de Défaillance et leurs Effets
AMDEC	Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité

TABLE A.6 – Sûreté de fonctionnement

Annexe B

Les risques naturels : cadre, outils de gestion et sources d'incertitudes

Cette annexe apporte des éléments complémentaires de description du cadre de la gestion des risques et de l'objet des expertises mises en œuvre. Elle concerne par exemple l'identification des phénomènes et la définition puis le diagnostic de mesures de protection (en prenant ici l'exemple de mesures de protection contre les risques torrentiels).

B.1 Représentations schématiques de processus d'expertise

Une décomposition sous forme de blocs-diagrammes est une première étape pour décrire les composantes d'un raisonnement (Tacnet et al., 2005a) (FIG. B.1).

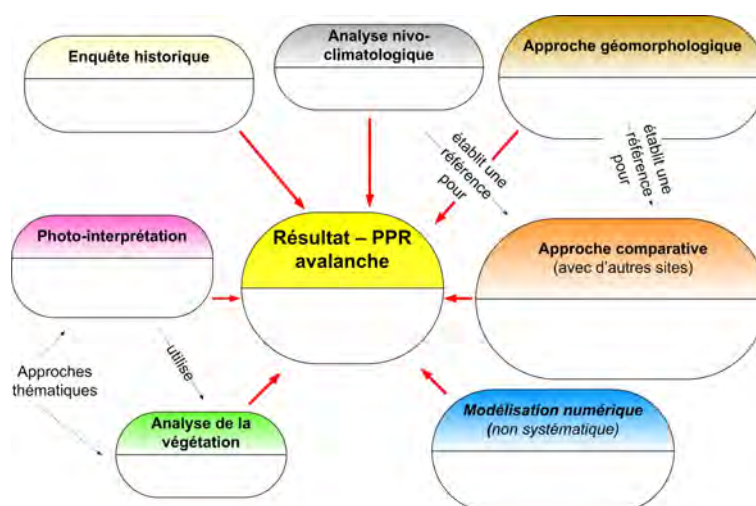


FIGURE B.1 – Composants de l'expertise dans le cadre de la réalisation d'un Plan de prévention des risques (*PPR*) avalanches

L'expertise exploite un flux d'information pour décrire un phénomène (FIG. B.2).

ANNEXE B. LES RISQUES NATURELS : CADRE, OUTILS DE GESTION ET SOURCES D'INCERTITUDES

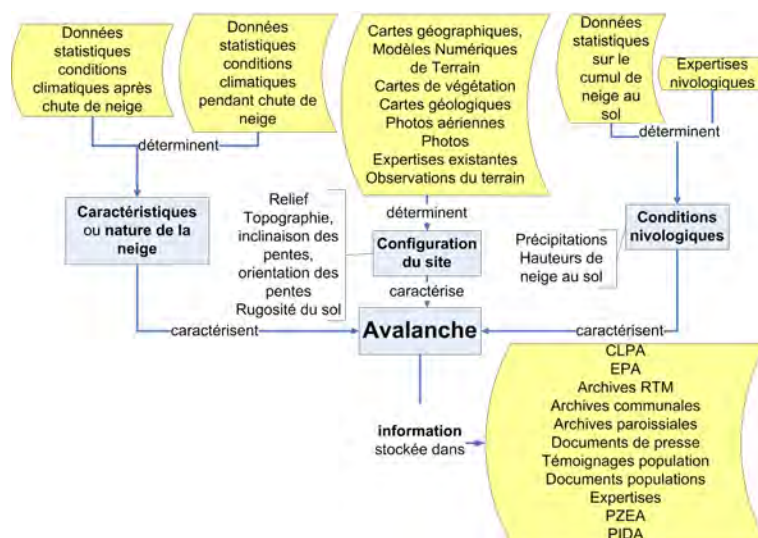


FIGURE B.2 – Amélioration de la traçabilité des raisonnements dans le cadre des plans de prévention des risques (*PPR*) avalanches : description des flux d'information

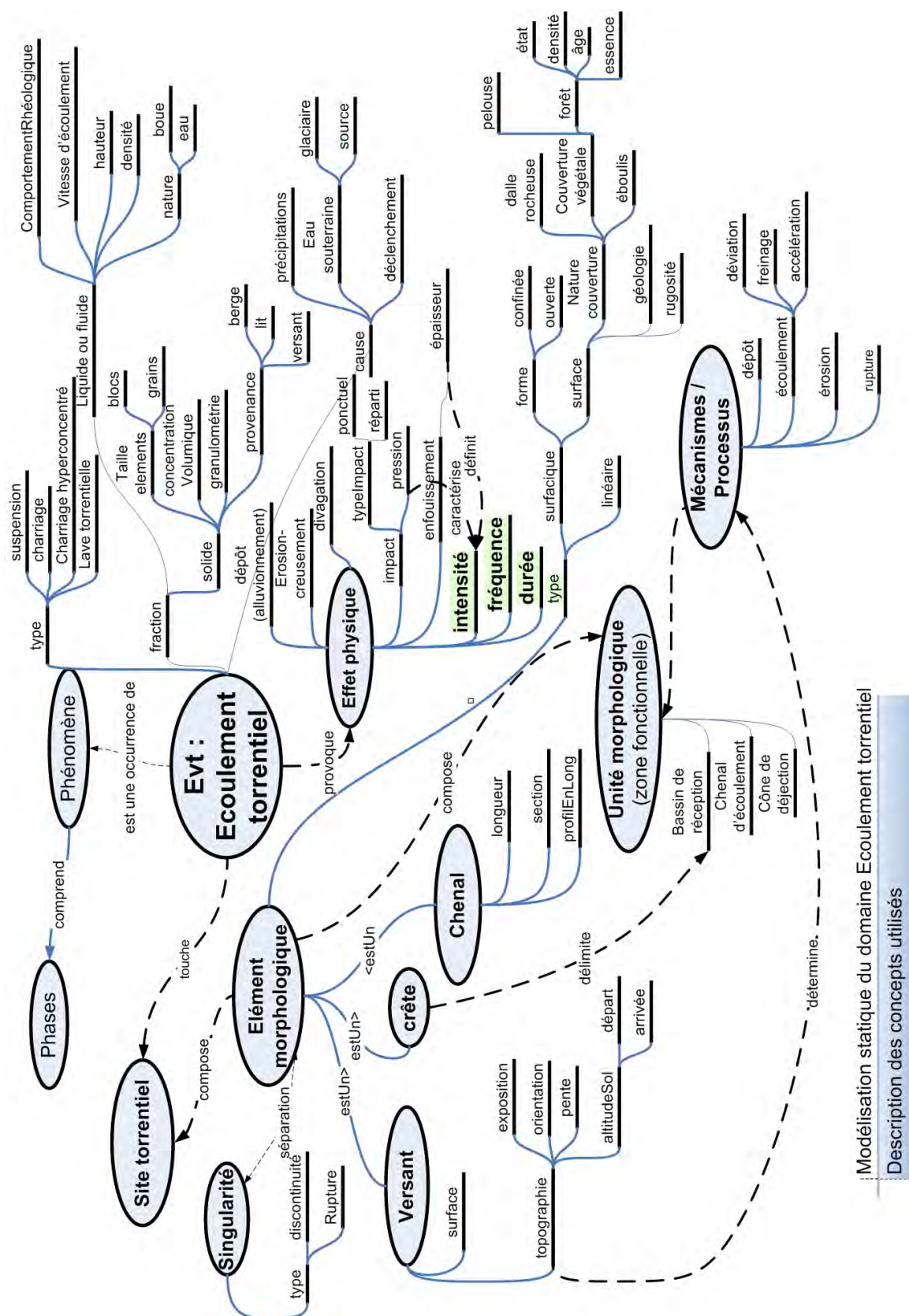


FIGURE B.4 – Modèle global du cadre d'analyse du domaine écoulement torrentiel (Pseudo-ontologie)

B.3. EXEMPLES DE STRATÉGIES ET DE MESURES STRUCTURELLES DE PROTECTION CONTRE LES RISQUES TORRENTIELS

B.3 Exemples de stratégies et de mesures structurelles de protection contre les risques torrentiels

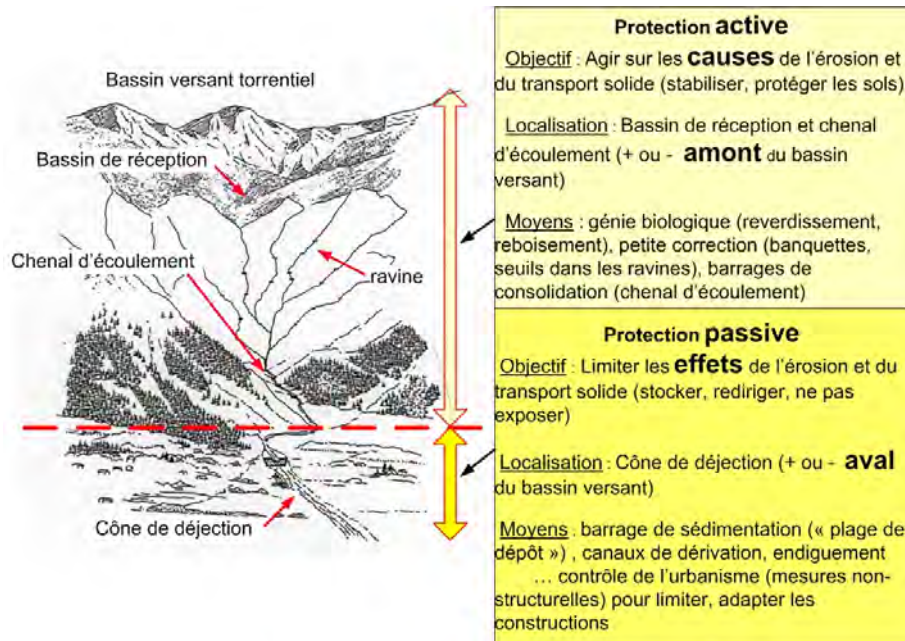


FIGURE B.5 – Stratégies de correction torrentielle active et passive (Tacnet et Richard, 2009)

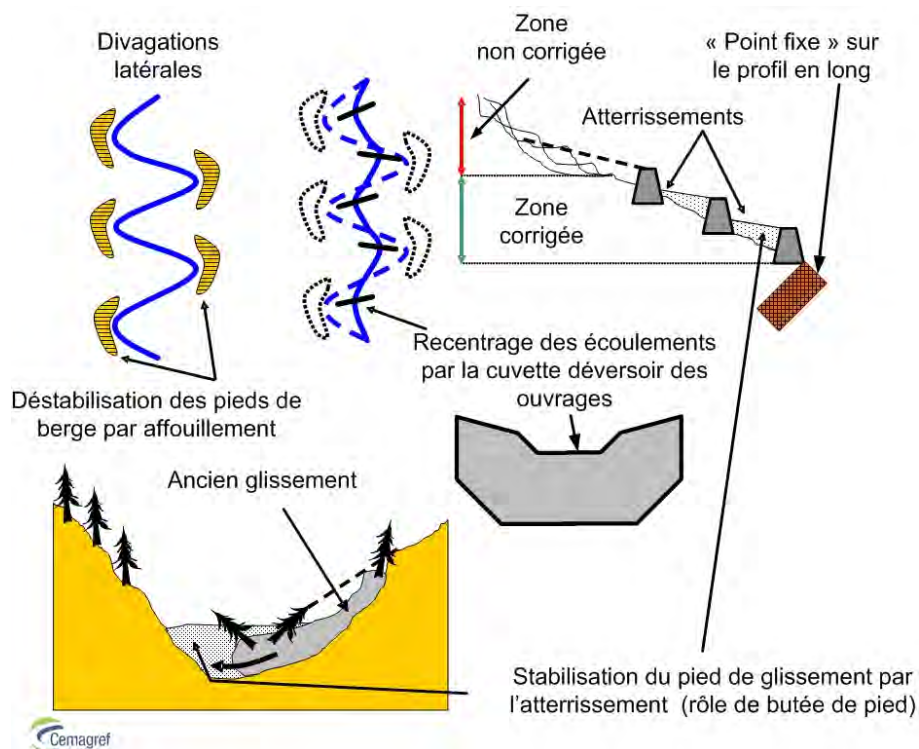


FIGURE B.6 – Rôle des barrages de correction torrentielle dits de "consolidation" (Tacnet et Richard, 2009)

ANNEXE B. LES RISQUES NATURELS : CADRE, OUTILS DE GESTION ET SOURCES D'INCERTITUDES

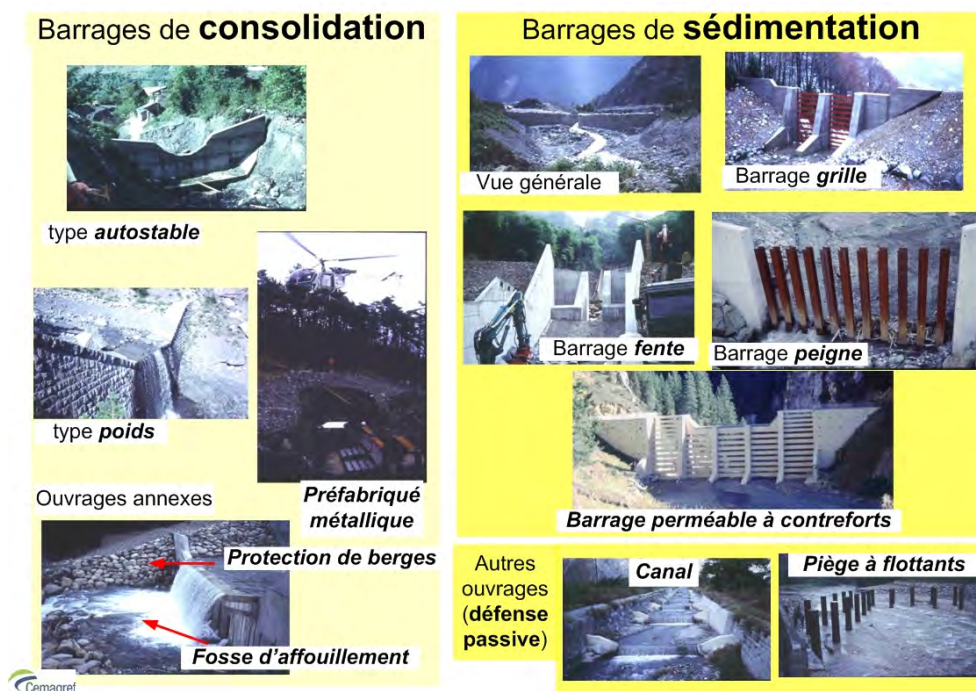


FIGURE B.7 – Exemples de barrages de consolidation et de sédimentation (Tacnet et Richard, 2009)

Le choix d'une stratégie de protection et/ou l'analyse de l'efficacité de mesures existantes sont des contextes de décision multicritères (FIG. B.8) .

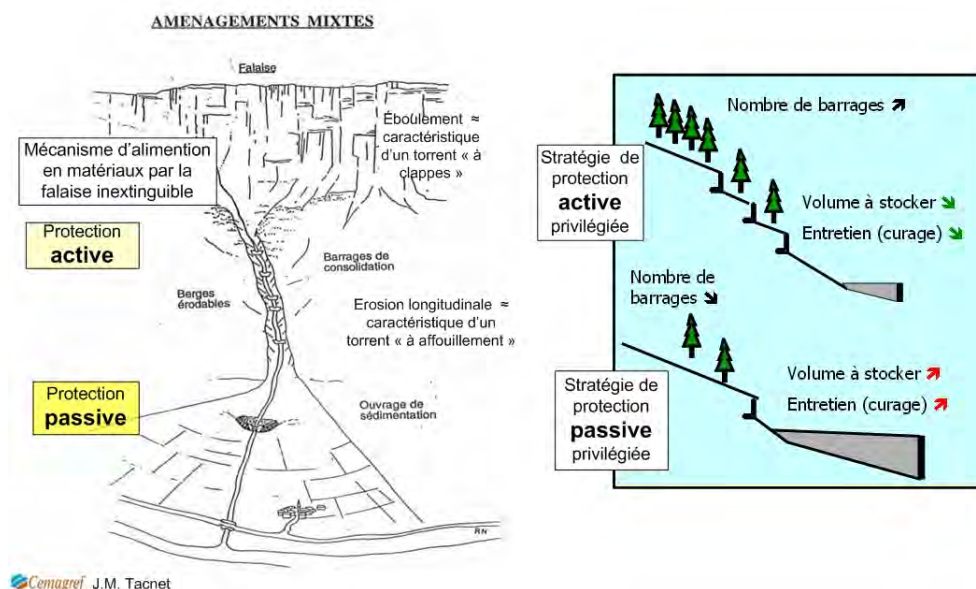


FIGURE B.8 – Exemple de décision : choix d'une stratégie de protection

B.4 Sources d'incertitude et expertise des risques torrentiels

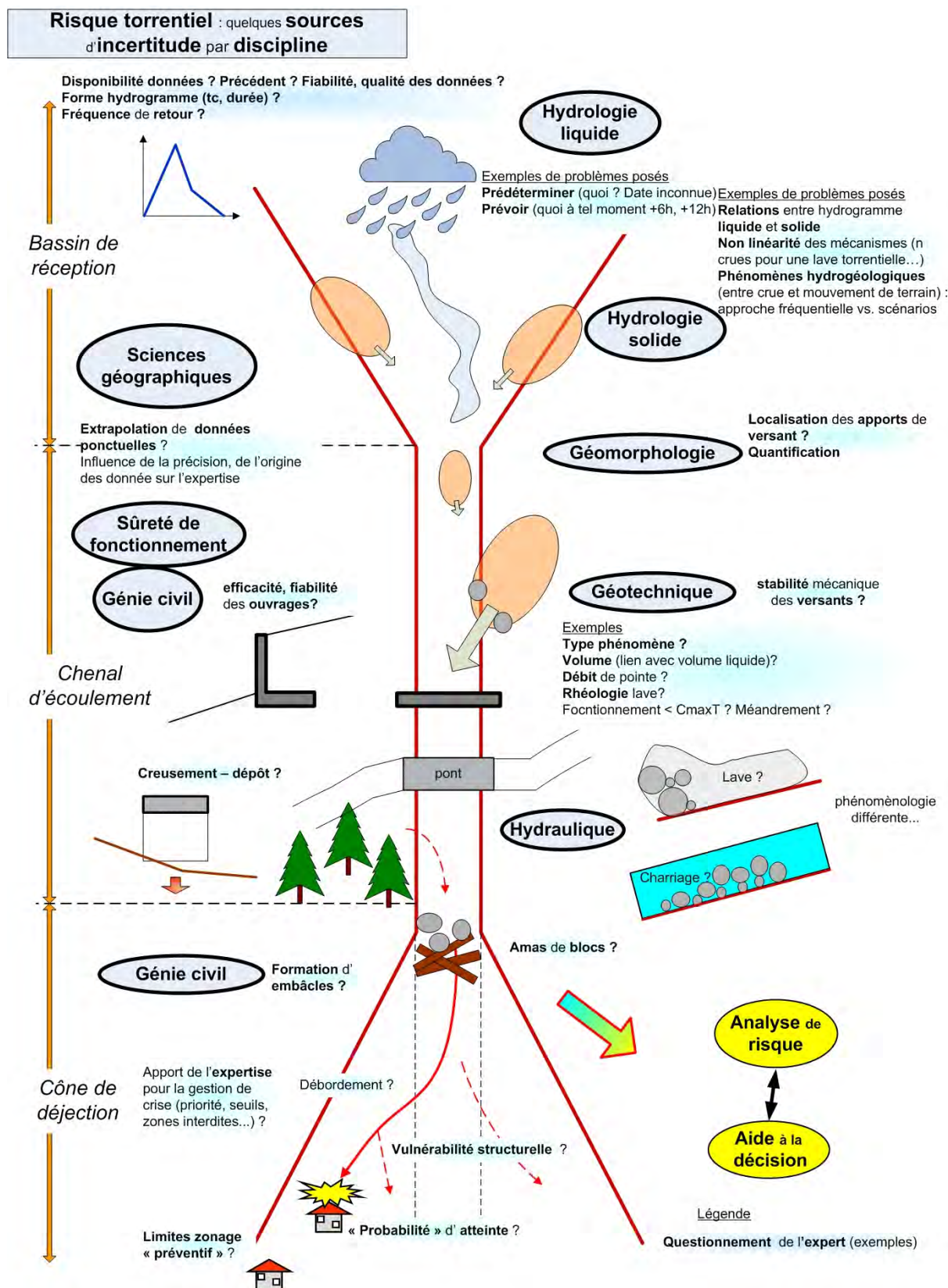


FIGURE B.9 – Sources d'incertitude dans l'analyse d'un bassin versant torrentiel

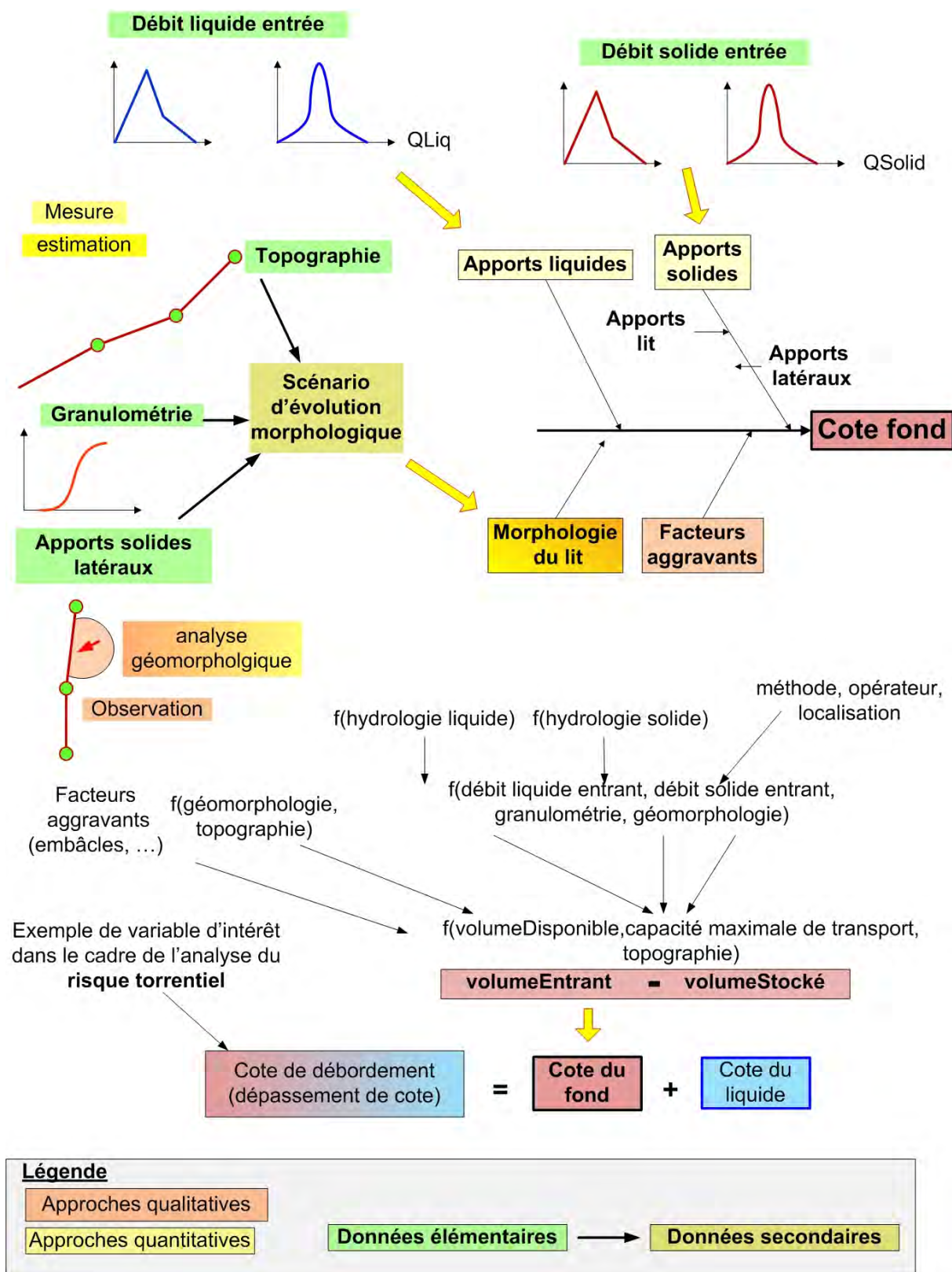


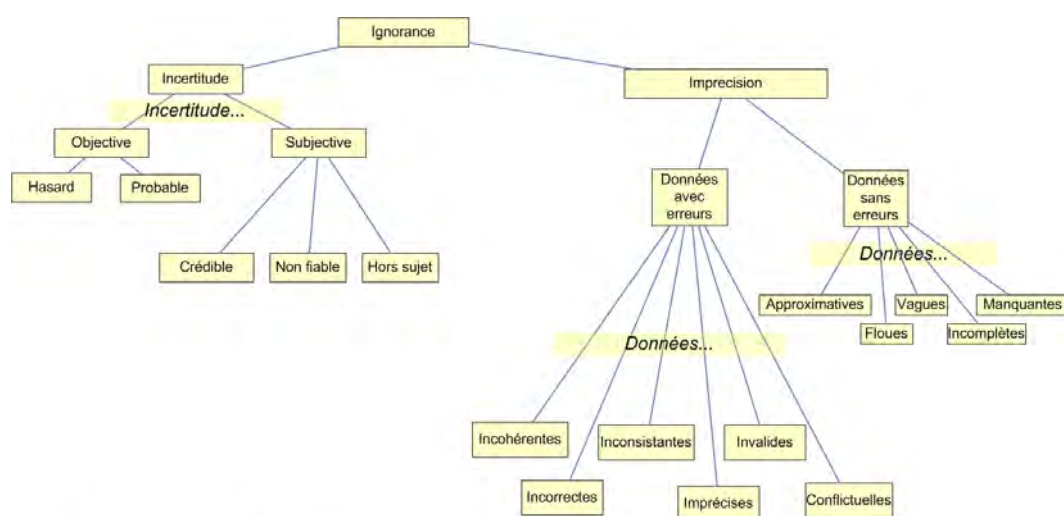
FIGURE B.10 – Eléments du raisonnement d'expertise du charriage torrentiel

Annexe C

Imperfection de l'information

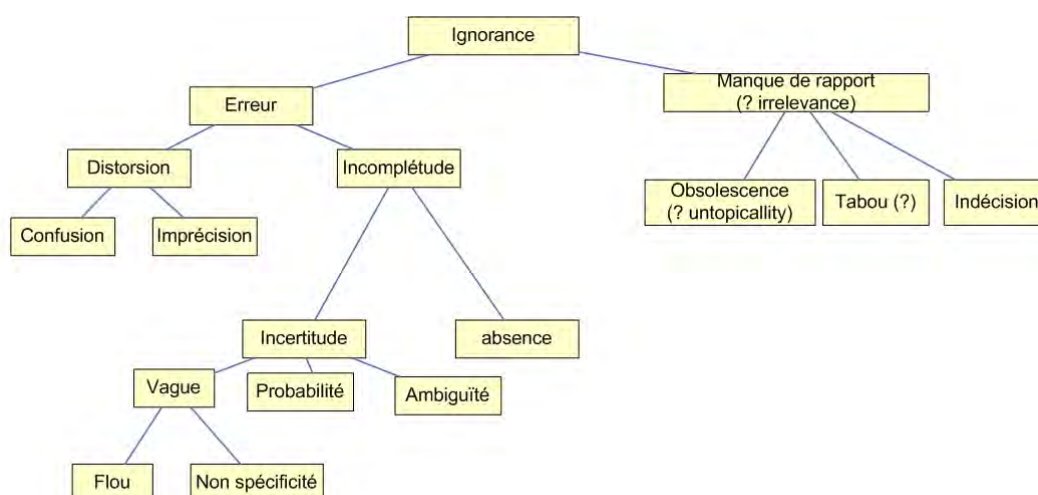
Cette annexe illustre la variété des typologies relatives à l'imperfection de l'information issues de la littérature et le cadre général des théories de l'incertain

C.1 Typologie des imperfections de l'information



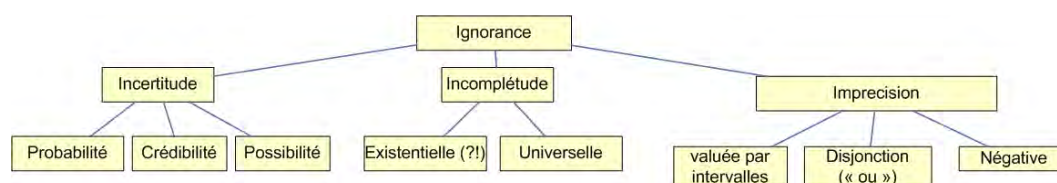
d'après Smets dans (Parsons S., 2001)

FIGURE C.1 – Taxonomie de l'incertitude et des imperfections de l'information (d'après Smets)



d'après Smithson dans (Parsons S., 2001)

FIGURE C.2 – Taxonomie de l'incertitude et des imperfections de l'information (d'après Smithson)



d'après Bonissone, Tong dans (Parsons S., 2001)

FIGURE C.3 – Taxonomie de l'incertitude et des imperfections de l'information (d'après Bonissone)

Annexe D

Probabilités, biais et subjectivité

D.1 Périodes de retour et probabilités sur la durée

L'exemple ci-dessous illustre un cas d'application très simple lié à la période de retour utilisée pour caractériser les phénomènes de référence dans le domaine des risques naturels.

Pour un événement de période de retour 100 ans, la probabilité d'avoir au moins un événement avec cette période de retour en 100 ans est de 0.63 (63%)

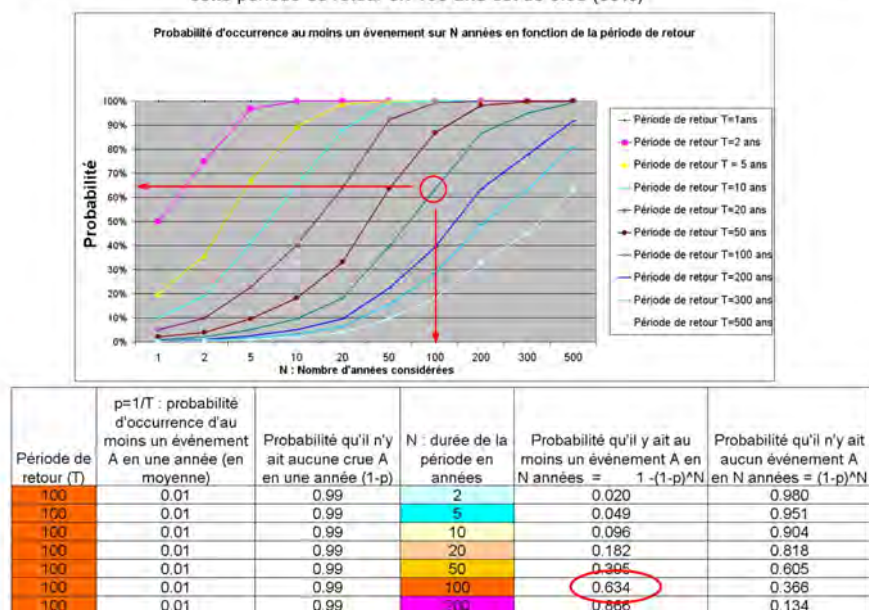


FIGURE D.1 – Un exemple de difficulté de compréhension des probabilités

D.2 Un exemple simple d'estimation du risque

L'exemple ci-dessous est un exemple basique d'estimation de risque (Dress, 2004). On considère une situation de choix d'une mesure de protection : la collectivité peut effectuer des travaux qui vont induire à une charge annuelle d'un montant R (remboursement d'emprunt, entretien ...). Un phénomène naturel va causer des dégâts avec les caractéristiques suivantes correspondant à $j = 4$ situations :

- aucun événement, probabilité $p_1 = 0.889$, coût des dommages $D_1 = 0\text{€}$
- événement de faible intensité, probabilité $p_2 = 0.1$ (événement décennal), coût des dommages $D_2 = 50000\text{€}$

- événement de forte intensité, probabilité $p_3 = 0.01$ (événement centennal), coût des dommages $D_3 = 200000\text{€}$
- événement d'intensité extrême, probabilité $p_4 = 0.001$ ((événement millennial), coût des dommages $D_4 = 1000000\text{€}$

Définition D.2.1 (Espérance mathématique) *L'espérance d'une variable aléatoire réelle discrète X , caractérisée par l'ensemble (fini ou dénombrable) de valeurs $\{x_i\}$, avec les probabilités ponctuelles $p_i = P(X = x_i)$ se note $E(X)$ ou μ_x et se définit par :*

$$E(x) = \sum_{x_i} x_i \cdot p_i \quad (\text{D.1})$$

En supposant que les travaux soient susceptibles de supprimer totalement le phénomène, la question est de savoir quelle est la somme "optimale" à dépenser pour que les travaux évitent les dommages. On définit la valeur G de l'année i par $G_i = R - D_i$. La valeur G de gain peut être négative (perte) ou positive (gain). La variable G est aussi appelée courbe d'utilité. Pour optimiser le rapport entre l'investissement annuel R et la perte, on cherche à maximiser l'espérance de la valeur G (DEF. D.2.1), soit ici ne rien perdre car on ne peut pas gagner de l'argent avec un ouvrage de protection On a donc :

$$\begin{aligned} E(G) &= \sum_{x_i} p_i \cdot (G_i) = 0.889 \cdot R + 0.1 \cdot (R - 50000) + 0.01 \cdot (R - 200000) + 0.001 \cdot (R - 1000000) \\ &= R - (0.1 \cdot 50000 + 0.01 \cdot 200000 + 0.001 \cdot 1000000) = R - 8000 \end{aligned}$$

La valeur de R pour laquelle $E(G) = 0$ est égale à 8000€ . En investissant dans un ouvrage correspondant à des charges annuelles égale à 8000€ , la collectivité couvre les risques associés aux phénomènes.

Cet exemple simple illustre le principe global des approches économiques du risque. Une échelle commune, monétaire, est retenue pour évaluer les dommages puis le risque. Le risque est mesuré par rapport à une perte entre la somme investie et le coût des dommages. La présentation ci-dessus correspond évidemment à une approche très simplifiée et fictive d'optimisation du risque (basée sur une perte monétaire dans ce cas).

D.3 Aversion aux risques dans le cadre de la théorie des perspectives

L'exemple ci-dessous est une adaptation issue de (Raufaste and Hilton, 2006)¹ présentant la théorie des perspectives (Kahneman and Tversky, 1979). Cette théorie montre l'aversion de choix risqués dans la zone de gains et une recherche de choix risqués dans la zone de perte.

Soit une *action* a (un dispositif de protection) ayant des résultats potentiels r_i auxquels sont associées des *utilités* $u(r_i)$ (protection des habitants, coût de la protection) et des *probabilités* $p(r_i)$ (associés aux événements naturels). La théorie classique de la décision calcule l'utilité espérée $U(a)$ d'une action a en sommant les produits des utilités et des probabilités de toutes les conséquences potentielles de l'action a :

$$U(a) = \sum u(r_i) \cdot p(r_i) \quad (\text{D.2})$$

La théorie des perspectives remplace :

1. tome 2, p.142 – 143

D.3. AVERSION AUX RISQUES DANS LE CADRE DE LA THÉORIE DES PERSPECTIVES

- l'utilité objective (montant) $u(r_i)$ par une fonction subjective (valeur) notée $v(u(r_i))$;
- la pondération objective $p(r_i)$ par une fonction subjective $\pi(p(r_i))$.

$v(\cdot)$ représente la valeur subjective ressentie en réponse au prix objectif du résultat de l'action envisagée $\pi(\cdot)$ représente la pondération ressentie face à la probabilité objective de réalisation du résultat.

La valeur subjective $V(a)$ résultante est :

$$V(a) = \sum v(u(r_i)) \cdot \pi(p(r_i)) \quad (\text{D.3})$$

La théorie des perspectives montre que la fonction $v(\cdot)$ présente deux propriétés fondamentales (FIG. D.2, (a)) : elle est convexe dans la région des pertes et concave dans la région des gains. La dissymétrie correspond au fait que la perte provoque une réaction négative d'intensité plus forte que la réaction positive provoquée par le gain équivalent. Ceci correspond à une aversion aux choix risqués dans la zone des gains et une recherche de choix risqués dans la zone des pertes. On admet que l'on peut exprimer tous les résultats sous une forme monétaire. On compare la possibilité de gain chiffré à 1000€ avec une probabilité de 0.75 avec la certitude d'un gain de 750€. La théorie classique donne une utilité espérée de 750€ dans les deux cas. La fonction de valeur $v(\cdot)$ est concave dans la zone des gains. La valeur subjective de 750€ notée $v(750)$ € sera supérieure à $0.75 \cdot v(1000)$ € : le choix se portera sur la valeur 750 correspondant à une perspective prudente.

Le choix se porte sur le résultat qui permet d'obtenir la plus grande valeur subjective.

La fonction de pondération $\pi(\cdot)$ possède la propriété de pondérer trop fortement les faibles probabilités objectives et trop faiblement les fortes probabilités objectives. Une réduction de l'incertitude dans les faibles valeurs, par exemple de 5% à 0%, a plus d'effet qu'une réduction de 10% à 5%. Les individus seront prêts à payer plus cher une protection éliminant totalement le risque qu'une protection réduisant le risque dans la même proportion mais tout en conservant un risque résiduel (FIG. D.2, (b)).

La version la plus récente de la théorie des perspectives a analysé l'interaction entre les utilités et les conditions d'incertitude. Les fonctions de pondération sont différentes selon les régions d'utilité considérées (zones de perte ou de gain). L'aversion du risque dépend alors de la fonction d'utilité mais aussi du niveau d'incertitude.

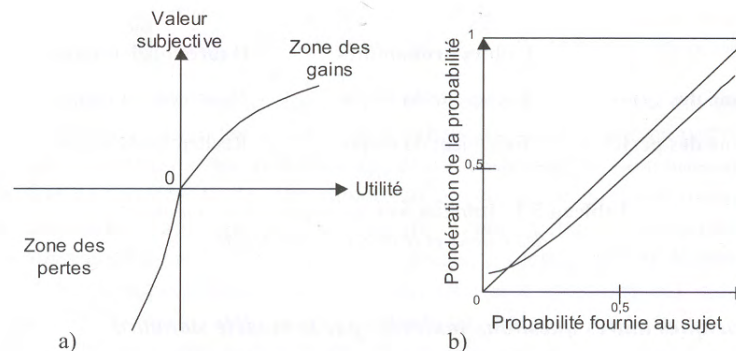


Figure 5.1. Les fonctions de subjectivation dans la théorie des perspectives

FIGURE D.2 – Utilité subjective dans la théorie des perspectives source (Raufaste and Hilton, 2006) p.143

D.4 Exemple de biais cognitifs : l'effet de cadrage et de renversement de préférences

L'effet de cadrage (*framing effect* en anglais) fait accorder plus d'importance à des caractéristiques non pertinentes d'un problème de décision. L'exemple ci-dessous est ici encore adapté à partir d'un exemple proposé par (Raufaste and Hilton, 2006)².

Situation n°1 : Un bassin versant est menacé par le déclenchement d'une lave torrentielle catastrophique. Deux stratégies de protection sont envisagées. La première permet, de manière certaine, de sauver 50 personnes mais sans une de plus. La seconde a une chance sur trois de sauver 150 personnes et deux chances sur trois de n'en sauver aucune. Dans cette situation, d'un point de vue rationnel, les deux solutions sont équivalentes, l'espérance d'utilité (les vies sauvées) est en effet la même dans les deux situations. L'expérience montre cependant que l'option la moins incertaine (certitude de sauver 50 vies) est choisie majoritairement par les sujets testés.

Situation n°2 : Le même bassin versant est menacé par le déclenchement d'une lave torrentielle. Deux stratégies de protection sont envisagées. La première fera périr 400 personnes à coup sûr mais sans une de plus. Dans la seconde, il y a une chance sur trois pour que personne ne meure et deux chances sur trois que 600 personnes décèdent. Ici encore, les solutions sont équivalentes du point de vue de leur espérance d'utilité. La solution retenue majoritairement sera pourtant la solution la plus incertaine (possibilité de sauver 600 vies).

Ces deux situations sont évidemment purement fictives mais illustrent l'importance des caractéristiques superficielles du problème et la possibilité de provoquer des renversements de préférences irrationnels entre plusieurs options.

D.5 Type de paradoxes

Différents types de paradoxes peuvent être identifiés lors de l'analyse de la théorie de la décision rationnelle.

2. p.141

D.5. TYPE DE PARADOXES

Terme	Définition
Paradoxe	problème techniquement aigu prenant la forme d'une contradiction à laquelle se heurte le modèle lorsqu'on explore ses tenants et aboutissants (Walliser, 1995) ³ .
Paradoxe logique	paradoxe aboutissant à une contradiction du modèle avec lui-même : certaines de ses conséquences sont incompatibles entre elles, remettant en cause la cohérence formelle du modèle (Paradoxe de Nash) (Walliser, 1995) ⁴ .
Paradoxe conceptuel	paradoxe selon lequel le modèle est en contradiction avec le bon sens : certaines de ses conséquences sont contre-intuitives, ruinant la pertinence explicative du modèle (Paradoxe de Newcomb) (Walliser, 1995) ⁵ .
Paradoxe empirique	paradoxe selon lequel le modèle est en contradiction avec les observations : certaines de ses conséquences sont manifestement irréalistes, ruinant la validité empirique du modèle (Paradoxe de Allais) (Walliser, 1995) ⁶ .

TABLE D.1 – Glossaire : modèles

Annexe E

Aide à la décision

E.1 Les méthodes multicritères élémentaires

Un certain nombre de méthodes élémentaires sont basées sur un principe d'agrégation totale.

E.1.1 La somme pondérée : la plus élémentaire des méthodes multicritères

La somme pondérée (DEF. E.1.1) est une méthode élémentaire souvent mise en œuvre dans les problèmes d'agrégation multicritères. Elle est basée sur une échelle de *notes* qui traduit l'échelle des *préférences*.

Chaque action est évaluée en affectant une note pour chaque critère. La somme pondérée peut s'appliquer si l'on peut exprimer tous les critères dans les mêmes unités et que les écarts sur les valeurs sont comparables et que l'on accepte leur compensation. Les poids p_j accordés aux critères représentent des *taux de substitution* : une forte valeur de poids attribuée à un critère permet de compenser des faibles valeurs attribuées à d'autres (Vincke, 1989)¹.

Définition E.1.1 (Somme pondérée) Soient $A = \{a_1, a_2, \dots, a_k, \dots, a_n\}$ l'ensemble des n actions (solutions, alternatives) évaluées et $C = \{c_1, c_2, \dots, c_j, \dots, c_M\}$ un ensemble de M critères pour lesquels on définit un poids p_j avec $j \in \{1, 2, \dots, M\}$. La somme pondérée est définie par la structure globale de préférence $\{P, I\}$ telle que :

$$\begin{cases} a_{k_1} P a_{k_2} & \text{si et seulement si } \sum_{j=1}^n p_j \cdot c_j(a_{k_1}) > \sum_{j=1}^n p_j \cdot c_j(a_{k_2}) \\ a_{k_1} I a_{k_2} & \text{si et seulement si } \sum_{j=1}^n p_j \cdot c_j(a_{k_1}) = \sum_{j=1}^n p_j \cdot c_j(a_{k_2}) \end{cases} \quad (\text{E.1})$$

with $k_1, k_2 \in \{1, 2, \dots, n\}$

E.1.2 La multiplication de ratios

Définition E.1.2 (Multiplication de ratios : évaluation globale d'une action a_i) Soient un ensemble de critères c_j , respectivement pondérés par les poids w_j , avec $j \in \{1, 2, \dots, m\}$ et une action a_i avec $i \in \{1, 2, \dots, n\}$. On note e_{ij} l'évaluation de l'action a_i relativement au critère c_j . L'évaluation globale (ou utilité totale) de l'action a_i par la méthode de la multiplication des ratios est définie par :

$$eval_{rm_i} = \prod_{j=1}^M \left(\frac{e_{ij}}{e_{kj}} \right)^{w_j} \text{ avec } k \text{ (quelconque)} \in \{1, 2, \dots, n\}$$

1. p.137 – 138

E.2 Modélisation des préférences

E.2.1 Structure et relation de préférences

Les définitions sont issues de (Bouyssou et Pirlot, 2006)².

Définition E.2.1 (Relation de préférence) Soit un ensemble de choix $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$, on note $a_i \succsim a_j$, correspondant à a_i "est préféré ou indifférent à" a_j , la relation binaire :

$$\succsim: A \times A \longrightarrow A \times A \text{ avec } a_i \succsim a_j \quad (\text{E.2})$$

Définition E.2.2 (Incomparabilité) Deux alternatives a_i et a_j sont dites incomparables pour un décideur ("le décideur aime au moins autant a_i que a_j ") si :

$$(\text{Non}(a_i \succsim a_j) \text{ et } \text{Non}(a_j \succsim a_i)) \quad (\text{E.3})$$

Définition E.2.3 (Préférence stricte) L'alternative a_i est dite préférée strictement à a_j par un décideur si :

$$a_i \succ a_j \iff (a_i \succsim a_j \text{ et } \text{Non}(a_j \succsim a_i)) \quad (\text{E.4})$$

La préférence stricte est notée $a_i \succ a_j$

E.2.2 Modèles de préférences en environnement certain, risqué et incertain

Les relations de préférences sont des relations binaires définies sur des produits cartésiens d'actions ou alternatives. Les modèles de préférences permettent d'évaluer des actions dans le cadre de la décision multicritères. Leur étude théorique se fait dans le cadre de théorie du *mesurage conjoint* (Bouyssou et Pirlot, 2006)³. Dans un cadre décisionnel, ces relations binaires sont notamment utilisées (Bouyssou and Vincke, 2002) pour :

- la décision en présence de critères multiples où une relation de préférence entre les critères permet de comparer les alternatives évaluées sur les dits critères (DEF. E.2.4) ;
- la décision dans le risque (DEF. E.2.5) ou l'incertain (DEF. E.2.6) où une relation de préférence permet de comparer des alternatives évaluées sur plusieurs *états de la nature* ;
- la décision inter-temporelle où la relation de préférence concerne des alternatives à différents moments.

Modèle d'utilité additive et décision multicritères

Dans le contexte de la décision multicritères, les *actions* ou *objets* composant l'ensemble A des objets sont des vecteurs d'évaluations sur n dimensions, attributs ou critères. On a $A \subseteq A_1 \times A_2 \times \dots \times A_i \times \dots \times A_n$ où A_i est l'ensemble des évaluations sur la $i^{\text{ème}}$ dimension. Un vecteur d'évaluation d'une action $x \in A$ s'écrit donc sous la forme $(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n)$ où x_i est l'évaluation du $i^{\text{ème}}$ critère. Chaque action est évaluée dans le cadre du modèle additif.

Définition E.2.4 (Modèle d'utilité additive : cas de la décision multicritères) Soit \succsim une relation binaire de préférence définie sur A un ensemble d'objets ou d'actions à comparer

2. p.26

3. p.63 §2.1

ou à évaluer selon i dimensions. On note x_i (resp. y_i) l'évaluation de $x \in A$ (resp. $y \in A$) selon la $i^{\text{ème}}$ dimension. Le modèle d'utilité additive dans le cas de la décision multicritères s'écrit :

$$x \succsim y \iff \sum_{i=1}^n u_i(x_i) \geq \sum_{i=1}^n u_i(y_i) \text{ avec } u_i \text{ une fonction dite d'utilité de } A_i \text{ dans } \mathbb{R} \quad (\text{E.5})$$

Modèle d'utilité espérée

Le modèle d'utilité espérée est utilisé dans le contexte de la *décision dans le risque*. Les éléments de A sont des distributions de probabilités sur un ensemble de conséquences Y soit $A \subseteq \mathcal{P}(Y)$ avec $\mathcal{P}(Y)$ un ensemble de mesures de probabilité sur un ensemble de conséquences Y .

Définition E.2.5 (Modèle d'utilité espérée) Soit \succsim une relation binaire de préférence définie sur A un ensemble d'objets ou d'actions à comparer ou à évaluer. On note Y l'ensemble des conséquences y issues des actions $x \in A$, u une fonction de Y dans \mathbb{R} et $p_x(t)$ la probabilité d'occurrence de l'élément $t \in Y$ avec l'objet x . Le modèle d'utilité espérée s'écrit :

$$x \succsim y \iff \sum_{t \in Y} p_x(t)u(t) \geq \sum_{t \in Y} p_y(t)u(t) \quad (\text{E.6})$$

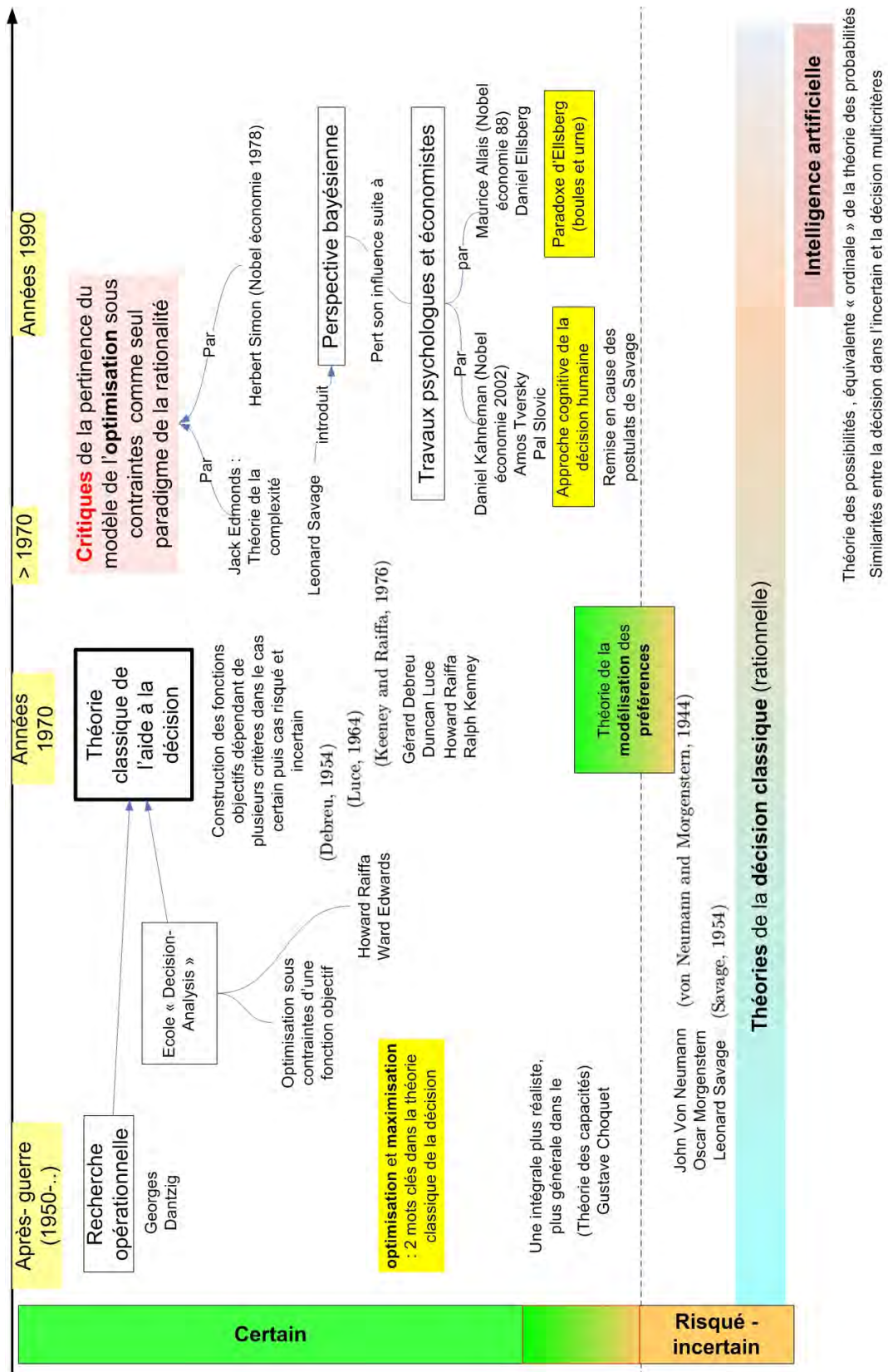
Modèle d'utilité espérée subjective

Le modèle d'utilité espérée subjective est utilisé dans le contexte de la *décision dans l'incertain*. Les éléments de A sont des conséquences liées à des états de la nature soit $A \subseteq Y^n$ avec Y un ensemble de conséquences sur la base de n états distincts.

Définition E.2.6 (Modèle d'utilité espérée subjective) Soit \succsim une relation binaire de préférence définie sur A un ensemble d'objets ou d'actions à comparer ou à évaluer. On note Y l'ensemble des conséquences y issues des actions $x \in A$, u une fonction de Y dans \mathbb{R} et p_i des nombres non négatifs dont la somme vaut 1 et qui s'interprètent comme les probabilités subjectives des différents états de la nature. Le modèle d'utilité espérée subjective s'écrit :

$$x \succsim y \iff \sum_{i=1}^n p_i u(x_i) \geq \sum_{i=1}^n p_i u(y_i) \quad (\text{E.7})$$

E.3 Historique des théories de la classique



d'après A. Tsoukias dans « Concepts et méthodes pour l'aide à la décision » (Bouysou, Dubois, Pirlot, Prade 2006)

FIGURE E.1 – Historique de l'évolution de la théorie de la décision classique

Annexe F

Théories pour l'information incertaine et imparfaite

Cette annexe présente une synthèse historique des différentes théories puis rappelle des définitions relatives aux théories pour l'information incertaine et imparfaite non développées dans le texte.

F.1 Historique des théories

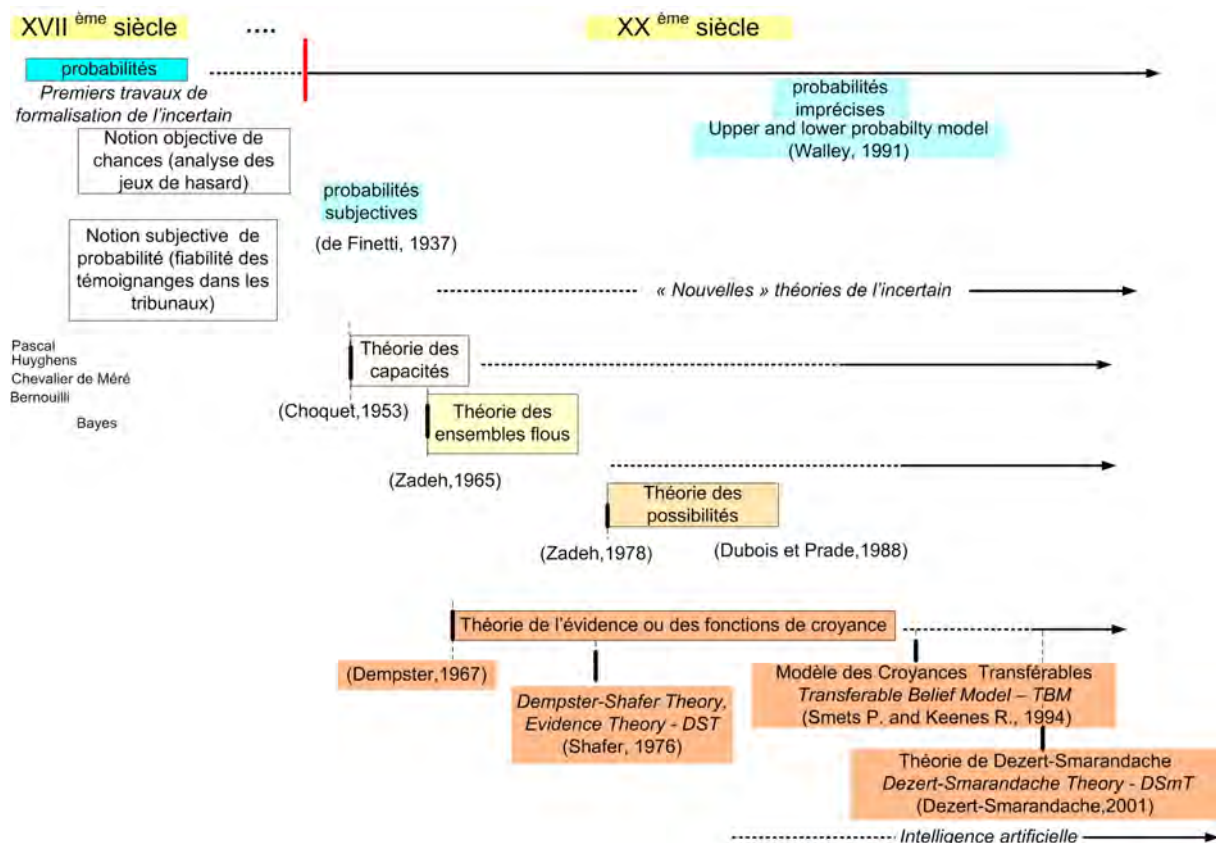


FIGURE F.1 – Histoire des "nouvelles" théories de l'incertain

F.2 Théorie des ensembles flous

F.2.1 Intervalles et nombres flous type L-R

Les données floues peuvent être représentées sous forme d'intervalles ou de nombre flou qui peuvent être définis paramétriquement de la manière suivante (Bouchon-Meunier, 1995)¹.

Nombre flou triangulaire

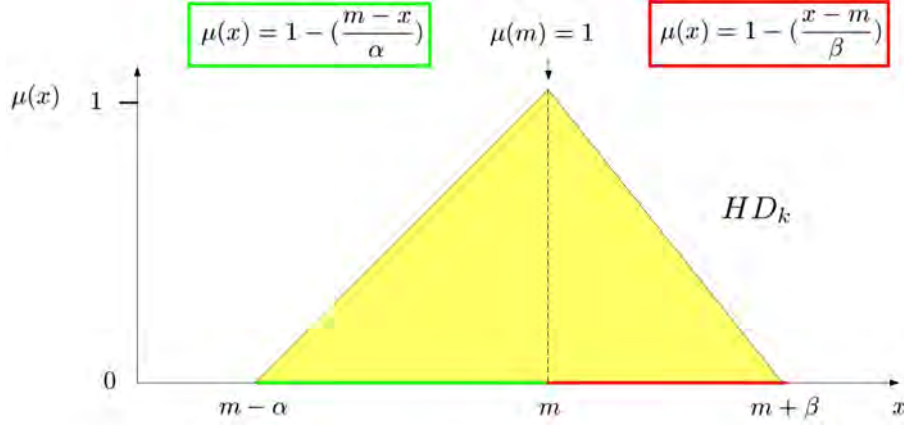


FIGURE F.2 – Représentation paramétrique d'un nombre flou (triangulaire)

Définition F.2.1 (Nombre flou de type L – R) Soient trois paramètres réels (m, α, β) avec α et β strictement positifs. Soient deux fonctions notées L et R définies par :

$$\begin{cases} L : [0, +\infty[\rightarrow [0, 1] \\ \forall x, L(0) = 1 \\ L(1) = 0 \end{cases} \quad \text{ou } L(x) > 0 \text{ avec } \lim_{x \rightarrow +\infty} L(x) = 0 \quad (\text{F.1})$$

et

$$\begin{cases} R : [0, +\infty[\rightarrow [0, 1] \\ \forall x, R(0) = 1 \\ R(1) = 0 \end{cases} \quad \text{ou } R(x) > 0 \text{ avec } \lim_{x \rightarrow +\infty} R(x) = 0 \quad (\text{F.2})$$

Un nombre flou (FIG. F.2) noté $(m, \alpha, \beta)_{LR}$ est de type L – R si sa fonction d'appartenance $\mu_I(x)$ est définie par :

$$\mu_I(x) = \begin{cases} L(\frac{m-x}{\alpha}) & \text{si } x \leq m \\ R(\frac{x-m}{\beta}) & \text{si } x > m \end{cases} \quad (\text{F.3})$$

Cas particulier :

- si $R(x) = L(x) = \max(0, 1 - x)$, l'intervalle flou $(m, \alpha, \beta)_{LR}$ a une fonction d'appartenance triangulaire;

Notation :

- m est la valeur modale;

¹. p.55

- α est la largeur du support de l'intervalle flou $(m, \alpha, \beta)_{LR}$ à gauche de m ou étalement à gauche ;
- β est la largeur du support de l'intervalle flou $(m, \alpha, \beta)_{LR}$ à droite de m ou étalement à droite.

Définition F.2.2 (Nombre flou $L - R$ triangulaire) Soient trois paramètres réels (m, α, β) avec α et β strictement positifs. Un nombre flou $L - R$ triangulaire est défini par :

$$\mu_I(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } x \leq m \\ 1 - (\frac{m-x}{\alpha}) & \text{si } m - \alpha < x < m \\ 1 & \text{si } x = m \\ 1 - (\frac{x-m}{\beta}) & \text{si } m < x < m + \beta \\ 0 & \text{si } x \geq m + \beta \end{cases} \quad (\text{F.4})$$

Intervalle flou de type $L - R$

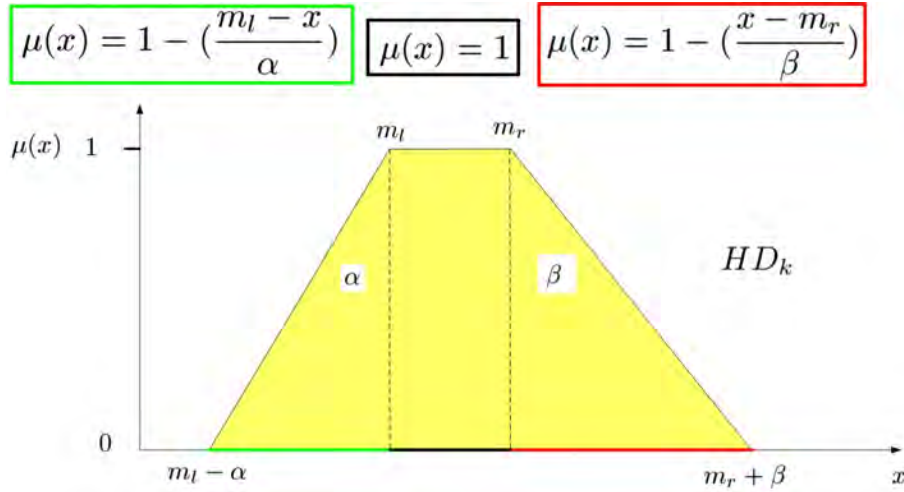


FIGURE F.3 – Représentation paramétrique d'un intervalle flou (trapézoïdal)

Définition F.2.3 (Intervalle flou de type $L - R$) Soient quatre paramètres réels $(m_l, m_r, \alpha, \beta)$ avec α et β strictement positifs et $m_r \geq m_l$. Soient deux fonctions notées L et R définies par :

$$\begin{cases} L : [0, +\infty[\rightarrow [0, 1] \\ \forall x, L(0) = 1 \\ L(1) = 0 \end{cases} \quad \text{ou } L(x) > 0 \text{ avec } \lim_{x \rightarrow +\infty} L(x) = 0 \quad (\text{F.5})$$

et

$$\begin{cases} R : [0, +\infty[\rightarrow [0, 1] \\ \forall x, R(0) = 1 \\ R(1) = 0 \end{cases} \quad \text{ou } R(x) > 0 \text{ avec } \lim_{x \rightarrow +\infty} R(x) = 0 \quad (\text{F.6})$$

Un intervalle flou I noté $(m_l, m_r, \alpha, \beta)_{LR}$ est de type $L - R$ si sa fonction d'appartenance $\mu_I(x)$ est définie par :

$$\mu_I(x) = \begin{cases} L(\frac{m_l-x}{\alpha}) & \text{si } x \leq m_l \\ 1 & \text{si } m_l < x < m_r \\ R(\frac{x-m_r}{\beta}) & \text{si } x \geq m_r \end{cases} \quad (\text{F.7})$$

Cas particulier :

- si $R(x) = L(x) = \max(0, 1 - x)$, l'intervalle flou $(m_l, m_r, \alpha, \beta)_{LR}$ a une fonction d'appartenance trapèzoïdale ;
- si $m_l = m_r$, l'intervalle flou $(m_l, m_r, \alpha, \beta)_{LR}$ est identique au nombre flou noté $(m, \alpha, \beta)_{LR}$ avec $m = m_l = m_r$.

Notation :

- m_l avec $\mu_I(m_l) = 1$ est la valeur modale à gauche ;
- m_r avec $\mu_I(m_r) = 1$ est la valeur modale à droite ;
- α est la largeur du support de l'intervalle flou $(m_l, m_r, \alpha, \beta)_{LR}$ à gauche de m_l ou étalement à gauche ;
- β est la largeur du support de l'intervalle flou $(m_l, m_r, \alpha, \beta)_{LR}$ à droite de m_r ou étalement à droite.

Définition F.2.4 (Intervalle flou $L - R$ trapèzoïdal) Soient quatre paramètres réels $(m_l, m_r, \alpha, \beta)$ avec α et β strictement positifs et $m_r \geq m_l$. Un intervalle flou $L - R$ trapèzoïdal (FIG. F.3) est défini par :

$$\mu_I(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } x \leq m_l - \alpha \\ 1 - \frac{(m_l - x)}{\alpha} & \text{si } m_l - \alpha < x < m_l \\ 1 & \text{si } m_l \leq x \leq m_r \\ 1 - \frac{(x - m_r)}{\beta} & \text{si } m_r < x < m_r + \beta \\ 0 & \text{si } x \geq m_r + \beta \end{cases} \quad (\text{F.8})$$

F.2.2 Propositions floues

Les définitions sont issues de (Bouchon-Meunier, 1995)²

Définition F.2.5 (Variable linguistique) Une variable linguistique sert à modéliser les connaissances imprécises ou vagues sur une variable. Elle se définit comme un triplet (V, X, T_V) dans lequel :

- V est une variable définie sur un ensemble de référence X (les valeurs de V sont prises dans X) ;
- T_V contient des sous-ensembles flous normalisés de X , utilisables pour caractériser V en langage courant, à l'aide de qualificatifs vagues.

Exemple : $V = \{\text{nombre d'habitants}\}$, $T_V = \{\text{faible, moyen, fort}\}$, $X = \mathbb{N}$ (le nombre d'habitants est un entier)

Définition F.2.6 (Modificateur linguistique) Un modificateur linguistique est un opérateur noté mod qui permet de produire une nouvelle caractérisation floue $\text{mod}(A)$ à partir d'une caractérisation floue A de V . La fonction d'appartenance de $\text{mod}(A)$ est obtenue par l'intermédiaire d'une transformation mathématique attachée à t_{mod} telle que $f_{\text{mod}(A)} = t_{\text{mod}}(f_A)$.

Exemple : $M = \{\text{peu, plutôt, très}\}$

Définition F.2.7 (Proposition floue élémentaire) Soient un ensemble L de variables linguistiques et un ensemble M de modificateurs linguistiques, une proposition floue élémentaire

est définie à partir d'une variable linguistique (V, X, T_V) de L par la qualification V est A , avec A une caractérisation floue appartenant à T_V où à $M(T_V)$. La valeur de vérité d'une proposition floue élémentaire V est A est caractérisée par la fonction d'appartenance μ_A de A .

Exemple : le nombre d'habitants (V) est très (M) faible (T_V)

F.3 Théories des fonctions de croyance

F.3.1 Exemple de calculs de fusion

Situation de conflit : l'exemple de L.Zadeh

L'exemple classique de Lofti Zadeh (1982)³ permet de montrer simplement les limites de la règle de *Dempster* dans les situations de fort conflit. Deux médecins, équitablement fiables, donnent, après l'examen médical d'un patient, un avis sur l'origine de la pathologie observée qui peut être, soit une méningite cérébro-spinale (M), soit une contusion cérébrale (C), soit enfin une tumeur cérébrale (T). Le cadre de discernement contenant les hypothèses des médecins est donc $\Theta = \{M, C, T\}$. Les deux médecins sont les sources notées m_1 et m_2 . Les médecins ne croient quasiment pas à la tumeur cérébrale mais sont en désaccord sur l'origine possible entre les deux hypothèses restantes. Ils attribuent les masses de croyance suivantes aux trois pathologies (TAB. F.1).

Eléments	M	C	T
m_1	0.99	0	0.01
m_2	0	0.99	0.01

TABLE F.1 – Tableau masses de croyances - Exemple de Zadeh - $Card(\Theta) = 3$

On applique la règle de *Dempster* rappelée ci dessous :

$$m(X) \triangleq [m_1 \oplus m_2] = \frac{\sum_{A \cap B = X} m_1(A)m_2(B)}{1 - \sum_{A \cap B = \emptyset} m_1(A)m_2(B)} = \frac{\sum_{A \cap B = X} m_1(A)m_2(B)}{1 - K}$$

Fusion conjonctive des deux sources m_1 et m_2

$$m_{12}(M) = m_1(M) \cdot m_2(M) = 0.99 \cdot 0 = 0$$

$$m_{12}(C) = m_1(C) \cdot m_2(C) = 0 \cdot 0.99 = 0$$

$$m_{12}(T) = m_1(T) \cdot m_2(T) = 0.01 \cdot 0.01 = 0.0001$$

Calcul du conflit et normalisation

K représente le conflit total

$$K = m_{12}(\theta_1 \cap \theta_2 \equiv \emptyset) = m_1(M) \cdot m_2(C) + m_1(M) \cdot m_2(T) + m_2(C) \cdot m_1(T)$$

$$K = m_{12}(\theta_1 \cap \theta_2 \equiv \emptyset) = 0.99 \cdot 0.99 + 0.99 \cdot 0.01 + 0.99 \cdot 0.01 = 0.9801 + 0.0099 + 0.0099 = 0.9999$$

$$\text{La normalisation donne finalement } m_1 \oplus m_2(T) = \frac{m_1(T) \cdot m_2(T)}{1 - K} = \frac{0.0001}{1 - 0.9999} = 1$$

Le résultat de la fusion est donc qu'il faut opérer d'une tumeur alors que les deux médecins sont d'accord pour dire que ce n'est pas la pathologie dont souffre le patient.

3. voir (Dezert, 2003) pour une analyse complète

Fusion conjonctive : 3 sources, 2 hypothèses

Cet exemple est issu de (Dezert and Smarandache, 2006) dans lequel le lecteur pourra trouver une application de la règle classique *Dsm* et de la règle de répartition proportionnelle du conflit *PCR5* avec les mêmes données numériques. Soit un cadre de discernement $\Theta = \{\theta_1, \theta_2\}$ composé de deux hypothèses exclusives (intersection nulle), nous décrivons ici la fusion conjonctive pour trois sources m_1 , m_2 et m_3 .

$$\begin{array}{lll} m_1(\theta_1) = 0.6 & m_1(\theta_2) = 0.3 & m_1(\theta_1 \cup \theta_2) = 0.1 \\ m_2(\theta_1) = 0.2 & m_2(\theta_2) = 0.3 & m_2(\theta_1 \cup \theta_2) = 0.5 \\ m_3(\theta_1) = 0.4 & m_3(\theta_2) = 0.4 & m_3(\theta_1 \cup \theta_2) = 0.2 \end{array}$$

Eléments	m_1	m_2	m_3
θ_1	0.6	0.2	0.4
θ_2	0.3	0.3	0.4
$\theta_1 \cup \theta_2$	0.5	0.3	0.2

TABLE F.2 – Tableau masses de croyances avant fusion - 3 sources - $Card(\Theta) = 2$

Etape n°1 : fusion conjonctive des deux sources m_1 et m_2

$$\begin{aligned} m_{12}(\theta_1) &= m_1(\theta_1).m_2(\theta_1) + m_1(\theta_1).m_2(\theta_1 \cup \theta_1) + m_2(\theta_1).m_1(\theta_1 \cup \theta_1) \\ m_{12}(\theta_1) &= 0.6 \cdot 0.2 + 0.6 \cdot 0.5 + 0.2 \cdot 0.1 = 0.44 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} m_{12}(\theta_2) &= m_1(\theta_2).m_2(\theta_2) + m_1(\theta_2).m_2(\theta_1 \cup \theta_1) + m_2(\theta_2).m_1(\theta_1 \cup \theta_1) \\ m_{12}(\theta_2) &= 0.3 \cdot 0.3 + 0.3 \cdot 0.5 + 0.3 \cdot 0.1 = 0.27 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} m_{12}(\theta_1 \cup \theta_2) &= m_1(\theta_1 \cup \theta_1).m_2(\theta_1 \cup \theta_1) \\ m_{12}(\theta_1 \cup \theta_2) &= 0.1 \cdot 0.5 = 0.05 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} m_{12}(\theta_1 \cap \theta_2) &= m_1(\theta_1).m_2(\theta_2) + m_1(\theta_2).m_2(\theta_1) \\ m_{12}(\theta_1 \cap \theta_2) &= 0.6 \cdot 0.3 + 0.2 \cdot 0.3 = 0.24 \end{aligned}$$

$m_{12}(\theta_1 \cap \theta_2 \equiv \emptyset)$ représente le conflit total

Eléments	m_1	m_2	m_{12}
θ_1	0.6	0.2	0.44
θ_2	0.3	0.3	0.27
$\theta_1 \cup \theta_2$	0.5	0.3	0.05
$\theta_1 \cap \theta_2$	-	-	0.24

TABLE F.3 – Masses de croyances après l'étape n°1 : fusion conjonctive de m_1 et m_2

Etape n°2 : fusion conjonctive des deux sources m_{12} et m_3

Eléments	m_{12}	m_3
θ_1	0.44	0.4
θ_2	0.27	0.4
$\theta_1 \cup \theta_2$	0.05	0.2
$\theta_1 \cap \theta_2$	0.24	-

TABLE F.4 – Données masses de croyances de l'étape n°2 : fusion conjonctive de m_{12} et m_3

$$m_{123}(\theta_1) = m_{12}(\theta_1).m_3(\theta_1) + m_{12}(\theta_1).m_3(\theta_1 \cup \theta_1) + m_3(\theta_1).m_{12}(\theta_1 \cup \theta_1)$$

$$m_{123}(\theta_1) = 0.44 \cdot 0.4 + 0.44 \cdot 0.2 + 0.4 \cdot 0.05 = 0.284$$

$$m_{123}(\theta_2) = m_{12}(\theta_2).m_3(\theta_2) + m_{12}(\theta_2).m_3(\theta_1 \cup \theta_1) + m_3(\theta_2).m_{12}(\theta_1 \cup \theta_1)$$

$$m_{123}(\theta_2) = 0.27 \cdot 0.4 + 0.27 \cdot 0.2 + 0.4 \cdot 0.05 = 0.182$$

$$m_{123}(\theta_1 \cup \theta_2) = m_{12}(\theta_1 \cup \theta_1).m_3(\theta_1 \cup \theta_1)$$

$$m_{123}(\theta_1 \cup \theta_2) = 0.05 \cdot 0.2 = 0.01$$

$$m_{123}(\theta_1 \cap \theta_2) = m_{12}(\theta_1).m_3(\theta_2) + m_{12}(\theta_2).m_3(\theta_1) + m_{12}(\theta_1 \cap \theta_2).m_3(\theta_1) + m_{12}(\theta_1 \cap \theta_2).m_3(\theta_2) +$$

$$m_{12}(\theta_1 \cap \theta_2).m_3(\theta_1 \cap \theta_2)$$

$$m_{123}(\theta_1 \cap \theta_2) = 0.44 \cdot 0.4 + 0.4 \cdot 0.27 + 0.24 \cdot 0.4 + 0.24 \cdot 0.4 + 0.24 \cdot 0.2 = 0.524$$

$m_{123}(\theta_1 \cap \theta_2)$ représente le conflit total (K) qui est utilisé dans la règle de *Dempster* pour effectuer la normalisation.

F.3.2 Règles de fusion

Propriétés des règles de fusion

Définition F.3.1 (Commutativité) Soit un élément X du power-set 2^Θ (ou de l'hyper-powerSet D^Θ dans le cadre de la DSMT), soit deux masses de croyance $m_1(\cdot)$ et $m_2(\cdot)$ associées aux deux sources β_1 et β_2 , l'opérateur de fusion \oplus est dit commutatif \iff

$$(m_1 \oplus m_2)(X) = (m_2 \oplus m_1)(X) \quad (\text{F.9})$$

Définition F.3.2 (Associativité) Soit un élément X du power-set 2^Θ (ou de l'hyper-powerSet D^Θ dans le cadre de la DSMT), soit trois masses de croyance $m_1(\cdot), m_2(\cdot)$ et $m_3(\cdot)$ associées aux trois sources β_1, β_2 et β_3 , l'opérateur de fusion \oplus est dit associatif \iff

$$m_1 \oplus (m_2 \oplus m_3)(X) = (m_1 \oplus m_2) \oplus m_3(X) \quad (\text{F.10})$$

Définition F.3.3 (Idempotence) Soit un élément X du power-set 2^Θ (ou de l'hyper-powerSet D^Θ dans le cadre de la DSMT), soit une masse de croyance $m_1(\cdot)$ associée à une source β_1 , l'opérateur de fusion \oplus est dit idempotent \iff

$$(m_1 \oplus m_1)(X) = m_1(X) \quad (\text{F.11})$$

Définition F.3.4 (Neutralité élément absorbant) Soit un élément quelconque X du power-set 2^Θ (ou de l'hyper-powerSet D^Θ dans le cadre de la DSmT), soit s masses de croyance $m_1(\cdot), m_2(\cdot), \dots, m_s(\cdot)$ associées à s sources ($s \geq 1$) non totalement ignorantes $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_s$, soit $m(\emptyset)$ la masse affectée à l'ensemble vide, l'opérateur de fusion \oplus est dit neutre vis à vis de l'élément absorbant \iff

$$[m_1 \oplus m_2 \oplus \dots \oplus m_s \oplus m_\emptyset](X) = [m_1 \oplus m_2 \oplus \dots \oplus m_s](X) \quad (\text{F.12})$$

Règles de fusion

Soit un élément X du power-set 2^Θ (ou de l'hyper-powerSet D^Θ dans le cadre de la DSmT), soit les jeux de masses de croyance $m_i(\cdot)$ associées aux sources β_i . Les règles de fusion généralisée se définissent de la manière suivante :

Règle conjonctive ou consensus conjonctif dans le cadre de la DST

$$m_\cap(X) = \sum_{\substack{X_1, X_2, \dots, X_k \in 2^\Theta \\ (X_1 \cap X_2 \cap \dots \cap X_k) = X}} \prod_{i=1}^k m_i(X_i) \quad (\text{F.13})$$

Règle conjonctive ou consensus conjonctif dans le cadre de la DSmT

$$m_\cap(X) = \sum_{\substack{X_1, X_2, \dots, X_k \in D^\Theta \\ (X_1 \cap X_2 \cap \dots \cap X_k) = X}} \prod_{i=1}^k m_i(X_i) \quad (\text{F.14})$$

Règle de Dubois et Prade Soient $A, B, C \in 2^\Theta$ et deux sources \mathcal{B}_1 et \mathcal{B}_2 exprimant des masses de croyance $m_1(\cdot)$ et $m_2(\cdot)$ sur les éléments de 2^Θ . La masse de l'hypothèse C résultant de la fusion des jeux de masses $m_1(\cdot)$ et $m_2(\cdot)$ par application de la règle de Dubois et Prade est égale à :

$$m(C) \triangleq [m_1 \oplus m_2] = \sum_{A \cap B = C} m_1(A) \cdot m_2(B) + \sum_{\substack{A \cup B = C \\ A \cap B = \emptyset}} m_1(A) \cdot m_2(B) \quad (\text{F.15})$$

Règles de redistribution partielle du conflit Les règles PCR permettent une redistribution partielle du conflit sur les éléments focaux. Les premières versions de ces règles (PCR1 à PCR5) ont été proposées par Jean Dezert et Florentin Smarandache (Dezert and Smarandache, 2006).

PCR5 2 sources

$$m_{PCR5}\{X\} = m_{12}\{X\} + \sum_{\substack{Y \in G^\Theta \setminus \{X\} \\ X \cap Y = \emptyset}} \left[\frac{m_1(X)^2 m_2(Y)}{m_1(X) + m_2(Y)} + \frac{m_2(X)^2 m_1(Y)}{m_2(X) + m_1(Y)} \right] \quad (\text{F.16})$$

Règle PCR5 avec un nombre de sources $s \geq 2$

$$\begin{aligned}
 m_{PCR5}\{X\} = m_{12\dots s}\{X\} + & \sum_{\substack{2 \leq t \leq s \\ 1 \leq r_1, \dots, r_t \leq s \\ 1 \leq r_1 < r_2 < \dots < r_{t-1} < (r_t = s)}} \sum_{\substack{X_{j_2}, \dots, X_{j_t} \in G^\Theta \setminus \{X\} \\ \{j_2, \dots, j_t\} \in P^{t-1}(\{1, \dots, n\}) \\ X \cap X_{j_2} \cap \dots \cap X_{j_t} = \emptyset \\ \{i_1, \dots, i_s\} \in P^s(\{1, \dots, s\})}} \\
 & \frac{(\prod_{k_1=1}^{r_1} m_{i_{k_1}}(X)^2) \cdot [\prod_{l=2}^t (\prod_{k_l=r_{l-1}+1}^{r_l} m_{i_{k_l}}(X_{j_l}))]}{(\prod_{k_1=1}^{r_1} m_{i_{k_1}}(X)) + [\sum_{l=2}^t (\prod_{k_l=r_{l-1}+1}^{r_l} m_{i_{k_l}}(X_{j_l}))]} \quad (F.17)
 \end{aligned}$$

Règle PCR5 avec 3 sources

Cette formulation correspond au développement de la règle PCR5 générique .

$$\begin{aligned}
 m_{PCR5}\{X\} = m_{123}\{X\} + & \sum_{\substack{X_{j_2} \in G^\Theta \setminus \{X\} \\ j_2 \in P(\{1, \dots, n\}) \\ X \cap X_{j_2} = \emptyset \\ \{i_1, i_2\} \in \{\{1,2\}, \{1,3\}, \{2,1\}, \{2,3\}, \{3,1\}, \{3,2\}\}}} \frac{m_{i_1}(X)^2 \cdot m_{i_2}(X_{j_2})}{m_{i_1}(X) + m_{i_2}(X_{j_2})} \\
 + & \sum_{\substack{X_{j_2}, X_{j_3} \in G^\Theta \setminus \{X\} \\ \{j_2, j_3\} \in P^2(\{1, \dots, n\}) \\ X \cap X_{j_2} \cap X_{j_3} = \emptyset \\ \{i_1, i_2, i_3\} \in \{\{1,2,3\}, \{1,3,2\}, \{2,1,3\}, \{2,3,1\}, \{3,1,2\}, \{3,2,1\}\}}} \frac{m_{i_1}(X)^2 \cdot m_{i_2}(X_{j_2}) \cdot m_{i_3}(X_{j_3})}{m_{i_1}(X) + m_{i_2}(X_{j_2}) \cdot m_{i_3}(X_{j_3}) + m_{i_3}(X_{j_3})} \quad (F.18)
 \end{aligned}$$

Règle PCR5 avec un nombre de sources $s \geq 2$ Cette reformulation de la règle PCR5 sous une forme plus compacte est proposée par Arnaud Martin (Martin and Osswald, 2006)⁴

$$\begin{aligned}
 m_{PCR5}\{X\} = m_c\{X\} + & \sum_{i=1}^M \sum_{\substack{(Y_{\sigma_i(1)}, \dots, Y_{\sigma_i(M-1)}) \in (D^\Theta)^{M-1} \\ \bigcap_{k=1}^{M-1} Y_{\sigma_i(k)} \cap X = \emptyset}} \frac{(\prod_{j=1}^{M-1} m_{\sigma_i(j)}(Y_{\sigma_i(j)}) \mathbf{1}_{j>i}) \prod_{Y_{\sigma_i(j)}=X} m_{\sigma_i(j)}(Y_{\sigma_i(j)})}{\sum_{Z \in \{X, Y_{\sigma_i(1)}, \dots, Y_{\sigma_i(M-1)}\}} \prod_{Y_{\sigma_i(j)}=Z} (m_{\sigma_i(j)}(Y_{\sigma_i(j)}) \cdot T(X=Z, m_i(X)))} \quad (F.19)
 \end{aligned}$$

avec σ_i de 1 à M en évitant i :

$$\begin{cases} \sigma_i(j) = j & \text{si } j < i \\ \sigma_i(j) = j + 1 & \text{si } j \geq i \end{cases}$$

et

$$\begin{cases} T(B, x) = x & \text{si B est vraie} \\ T(B, x) = 1 & \text{si B est fausse} \end{cases}$$

Règle PCR6 avec un nombre de sources $s \geq 2$

Cette formulation proposée par Arnaud Martin (Martin and Osswald, 2006) ⁵

$$m_{PCR6}\{X\} = m_c\{X\} + \sum_{i=1}^M m_i(X)^2 \sum_{\substack{(Y_{\sigma_i(1)}, \dots, Y_{\sigma_i(M-1)}) \in (D^\Theta)^{M-1} \\ \bigcap_{k=1}^{M-1} Y_{\sigma_i(k)} \cap X = \emptyset}} \left(\frac{(\prod_{j=1}^{M-1} m_{\sigma_i(j)}(Y_{\sigma_i(j)}))}{m_i(X) + \sum_{j=1}^{M-1} m_{\sigma_i(j)}(Y_{\sigma_i(j)})} \right) \quad (\text{F.20})$$

avec σ_i de 1 à M en évitant i :

$$\begin{cases} \sigma_i(j) = j & \text{si } j < i \\ \sigma_i(j) = j + 1 & \text{si } j \geq i \end{cases}$$

F.3.3 Méthodologie de mise en œuvre de la théorie $DSmT$

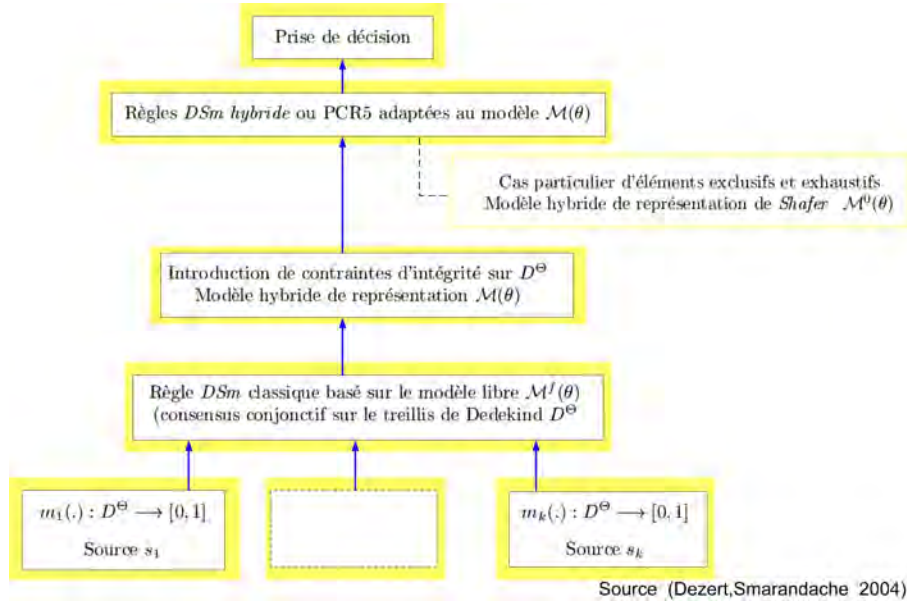


FIGURE F.4 – Méthodologie de mise en œuvre de la théorie de *Dezert-Smarandache* ($DSmT$) - (Dezert and Smarandache, 2004)

F.4 Théorie des probabilités - Définitions de base

Les définitions sont issues de (Dress, 2004).

Définition F.4.1 (Espace fondamental) *L'espace fondamental également appelé univers ou univers des possibles regroupe l'ensemble des événements élémentaires susceptibles de se réaliser comme résultats de l'expérimentation ou de l'observation d'un phénomène aléatoire.*

Définition F.4.2 (Espace probabilisable) *Un espace probabilisable est un doublet noté (Ω, \mathcal{A}) avec Ω un ensemble non vide de tous les résultats possibles, appelé espace fondamental et \mathcal{A} une famille de parties (événements) de Ω possédant les propriétés d'une tribu (σ algèbre) dont on pourra calculer la probabilité. Si Ω est dénombrable, \mathcal{A} est l'ensemble de $\mathcal{P}(\Omega)$ de toutes les parties de \mathcal{A} .*

5. p.73

Définition F.4.3 (Tribu ou σ algèbre) Une tribu est une famille (ensemble) \mathcal{A} de parties d'un espace Ω qui possède les propriétés nécessaires pour que (Ω, \mathcal{A}) soit un espace probabilisable. Soient un ensemble Ω et \mathcal{A} un sous-ensemble de $\mathcal{P}(\Omega)$ l'ensemble des parties de Ω . \mathcal{A} est une tribu ou σ algèbre si elle satisfait aux axiomes suivants :

- $\Omega \in \mathcal{A}$;
- si (A_n) avec $n \in \{1, 2, \dots\}$ est une suite d'éléments de \mathcal{A} alors $\bigcup_{n=1}^{\infty} A_n \in \mathcal{A}$ (stabilité par réunion dénombrable) ;
- si $A \in \mathcal{A}$, alors $\bar{A} \in \mathcal{A}$ (stabilité par passage au complémentaire).

Définition F.4.4 (Espace probabilisé) Un espace probabilisé est un triplet noté (Ω, \mathcal{A}, P) constitué par :

- Ω un ensemble non vide, appelé espace fondamental et représentant l'ensemble de tous les résultats possibles ;
- une famille \mathcal{A} de parties de Ω possédant les propriétés d'une tribu (ou σ algèbre) correspondant à l'ensemble de tous les événements auxquels on peut attribuer une probabilité ;
- une application $P : \mathcal{A} \longrightarrow [0, 1]$ possédant les propriétés d'une mesure de probabilité.

Définition F.4.5 (Événement) Etant donné un espace probabilisable (Ω, \mathcal{A}) associé à une épreuve (expérimentation ou observation d'un phénomène aléatoire), un événement élémentaire est une partie $A \in \mathcal{A}$. L'événement vide \emptyset correspond à la formulation "il ne s'est rien passé". Ω représente l'événement plein ou certain correspondant à "n'importe quoi s'est passé". Un singleton est constitué d'un seul événement élémentaire (résultat de l'expérimentation ou de l'observation d'un phénomène). Un événement peut être décrit par l'énumération (finie ou infinie) de tous les événements élémentaires qui le constituent ou par une propriété ou une caractéristique. Exemple d'événement : "pair" pour un dé lancé, "rouge" pour une boule tirée d'une urne, "mauvaise réponse" dans un jeu, "atteint" pour un enjeu dans une zone à risque, "lave torrentielle" pour un phénomène torrentiel ...

Définition F.4.6 (Mesure de probabilité) Soit un espace probabilisable (Ω, \mathcal{A}) , on dit qu'une application $P : \mathcal{A} \longrightarrow \mathbb{R}$, définie sur l'ensemble des événements associés à l'espace fondamental Ω est une mesure de probabilité si elle satisfait les trois axiomes suivants :

- $\forall A \in \mathcal{A}, 0 \leq P(A) \leq 1$. Les probabilités sont toujours positives et inférieures ou égales à 1 ;
- $P(\Omega) = 1$. Ω représente l'événement certain ;
- $A \cap B = \emptyset \implies P(A \cup B) = P(A) + P(B)$. Si deux événements sont disjoints, leurs probabilités s'ajoutent ;

Définition F.4.7 (Événement complémentaire) Soit un événement A , partie de l'espace fondamental Ω , son complémentaire est l'événement \bar{A} dont la réalisation correspond à la négation logique non- A : $w \in \bar{A} \iff \text{non-}(w \in A)$. Le complémentaire a les propriétés suivantes :

- $\overline{A \cup B} = \bar{A} \cap \bar{B}$;
- $\overline{A \cap B} = \bar{A} \cup \bar{B}$;
- $P(\bar{A}) = 1 - P(A)$.

Annexe G

Reconfiguration de modèles de décision hiérarchique

G.1 Modèles et principe de normalisation

G.1.1 Implémentation et notations des modèles de normalisation

La reconfiguration d'un modèle "à plat" en un modèle hiérarchique peut se faire selon 4 modèles de normalisation S , M , SM et SML (voir 7.2.2, p. 154). Les sections ci-dessous décrivent le principe et les notations utilisées pour l'implémentation.

Modèle original : *AHP*

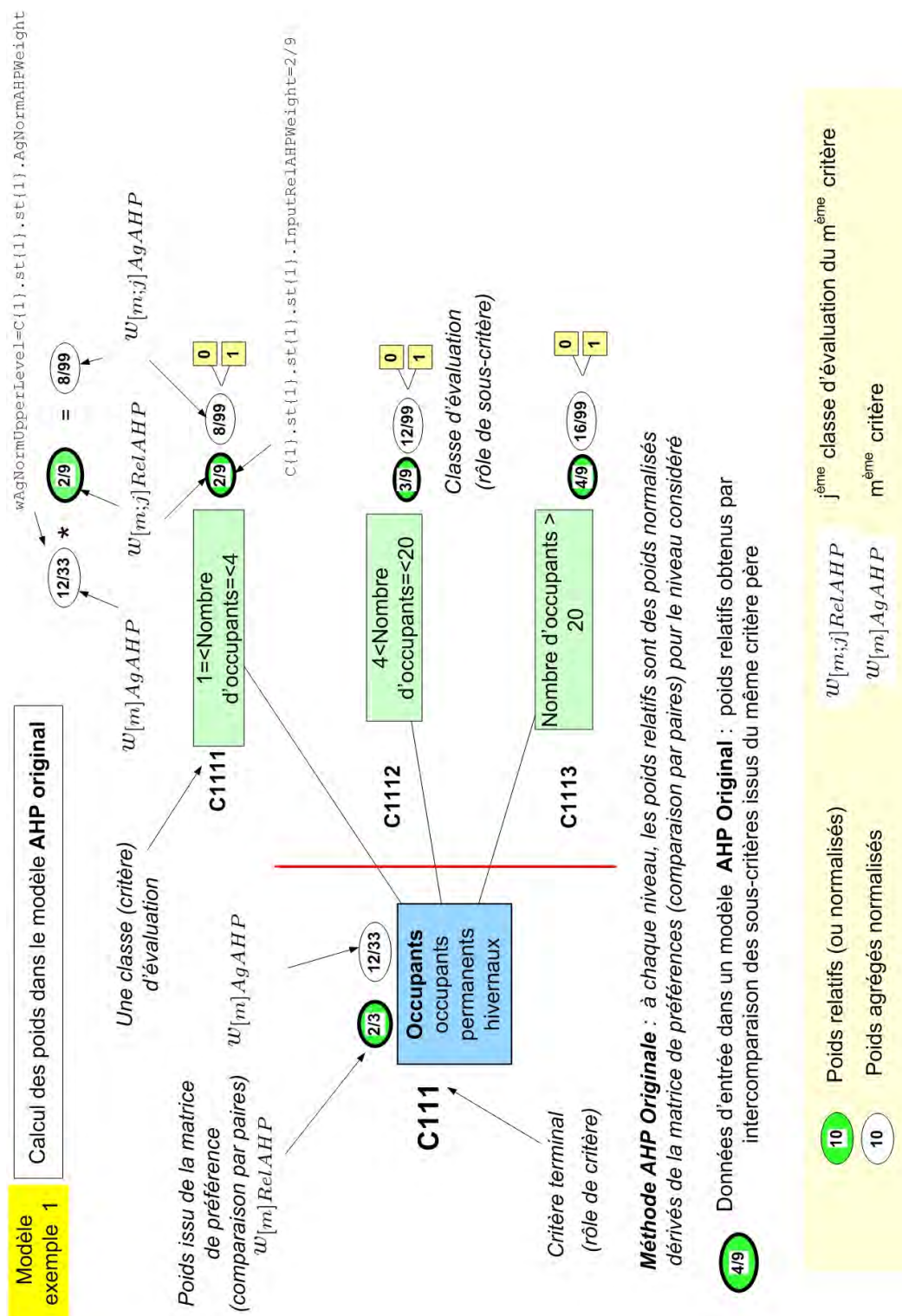


FIGURE G.1 – Implémentation de la normalisation dans le modèle original *AHP*





ANNEXE G. RECONFIGURATION DE MODÈLES DE DÉCISION HIÉRARCHIQUE

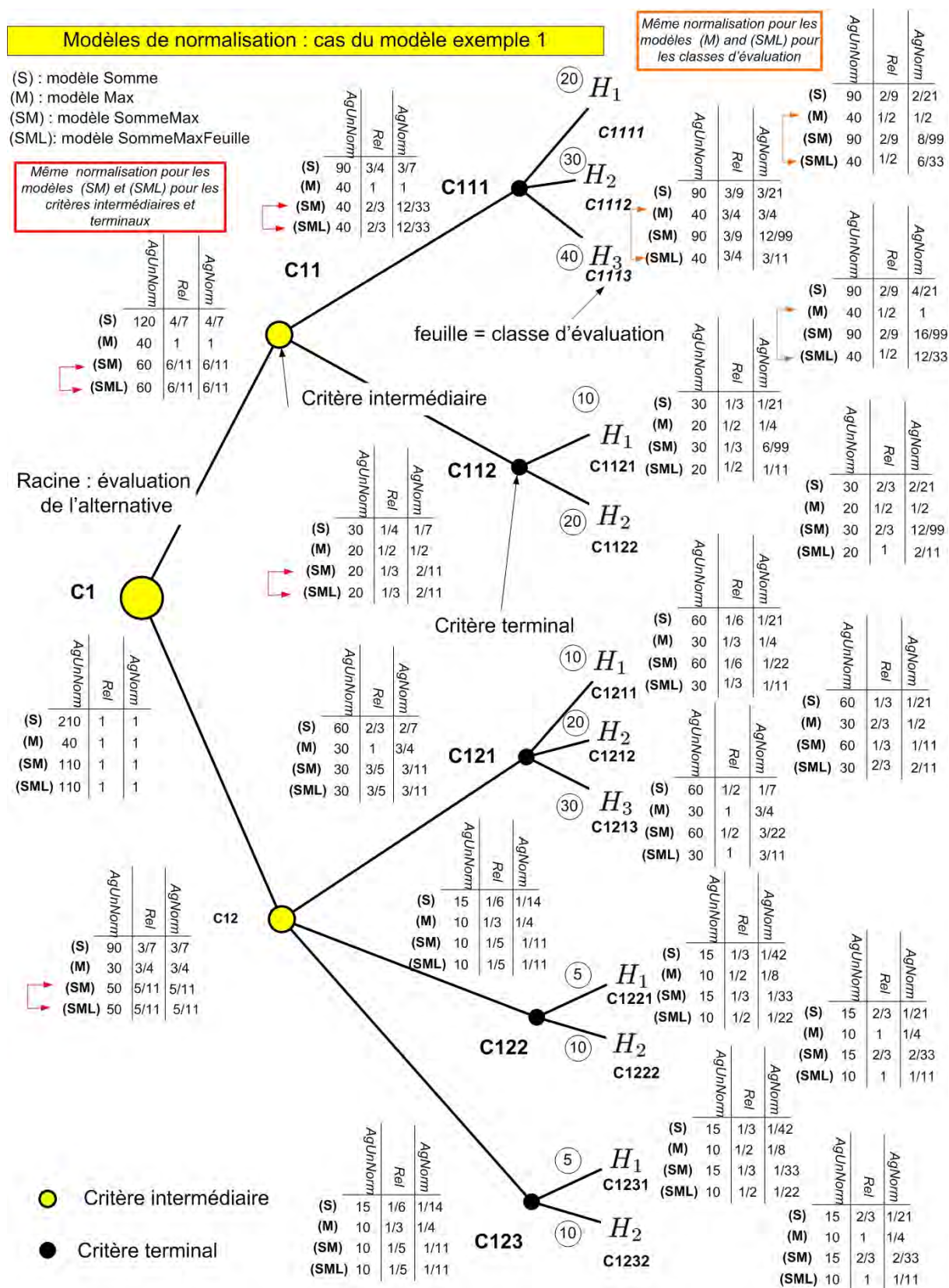


FIGURE G.7 – Application numérique des modèles de normalisation S , M , SM , SML au modèle fictif (ou simplifié) n° 1

G.2 Modèle exemple 1

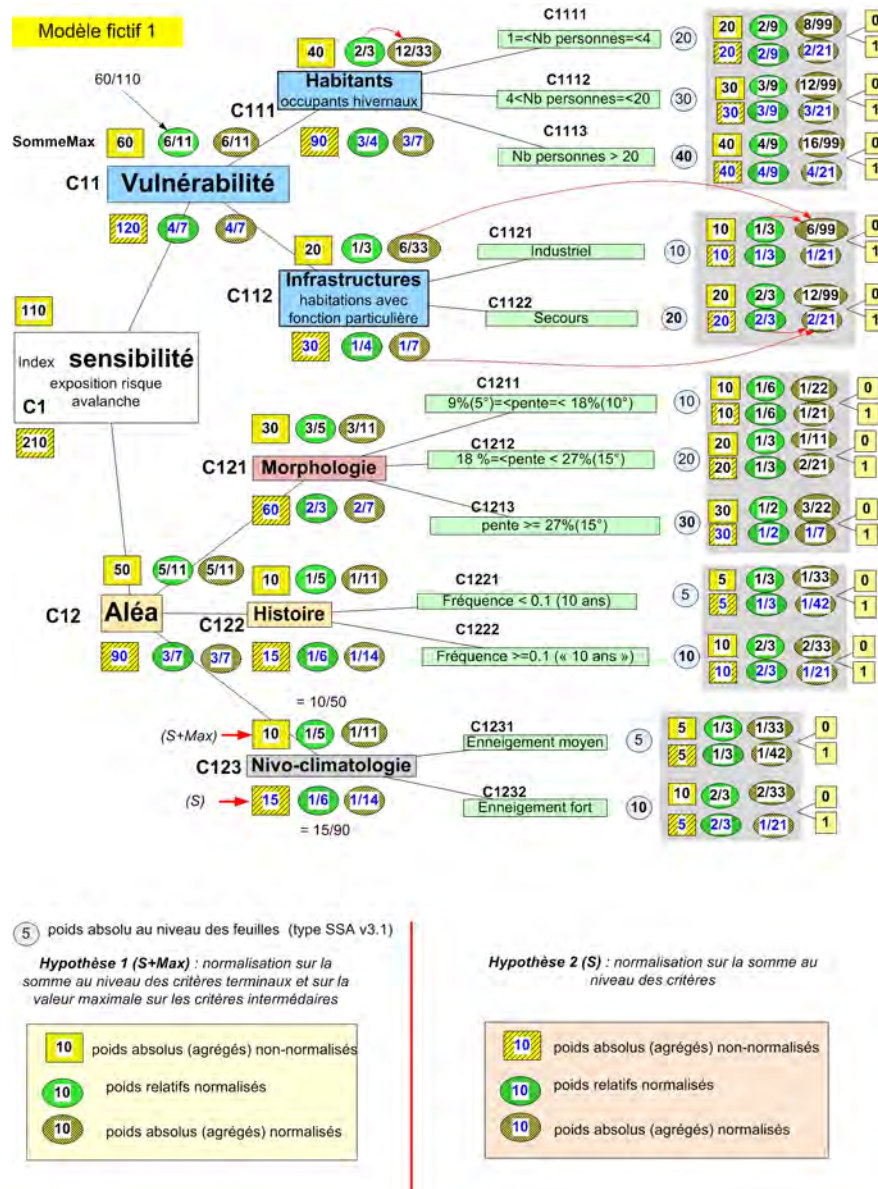


FIGURE G.8 – Arbre hiérarchique simplifié correspondant au modèle fictif (ou simplifié) n° 1

G.3 Modèle exemple 2

Le modèle simplifié n° 2 diffère du modèle simplifié n° 1 au niveau des classes (critères d'évaluation) du critère C_{112} (*Vulnérabilité-infrastructures*). Ce modèle est utilisé comme exemple notamment dans le cadre de l'approche *ER – MCDA* pour illustrer les capacités de la théorie *DSmT* par rapport à des critères correspondant à des regroupements de classes (exemple : secours et collectivité).

ANNEXE G. RECONFIGURATION DE MODÈLES DE DÉCISION HIÉRARCHIQUE

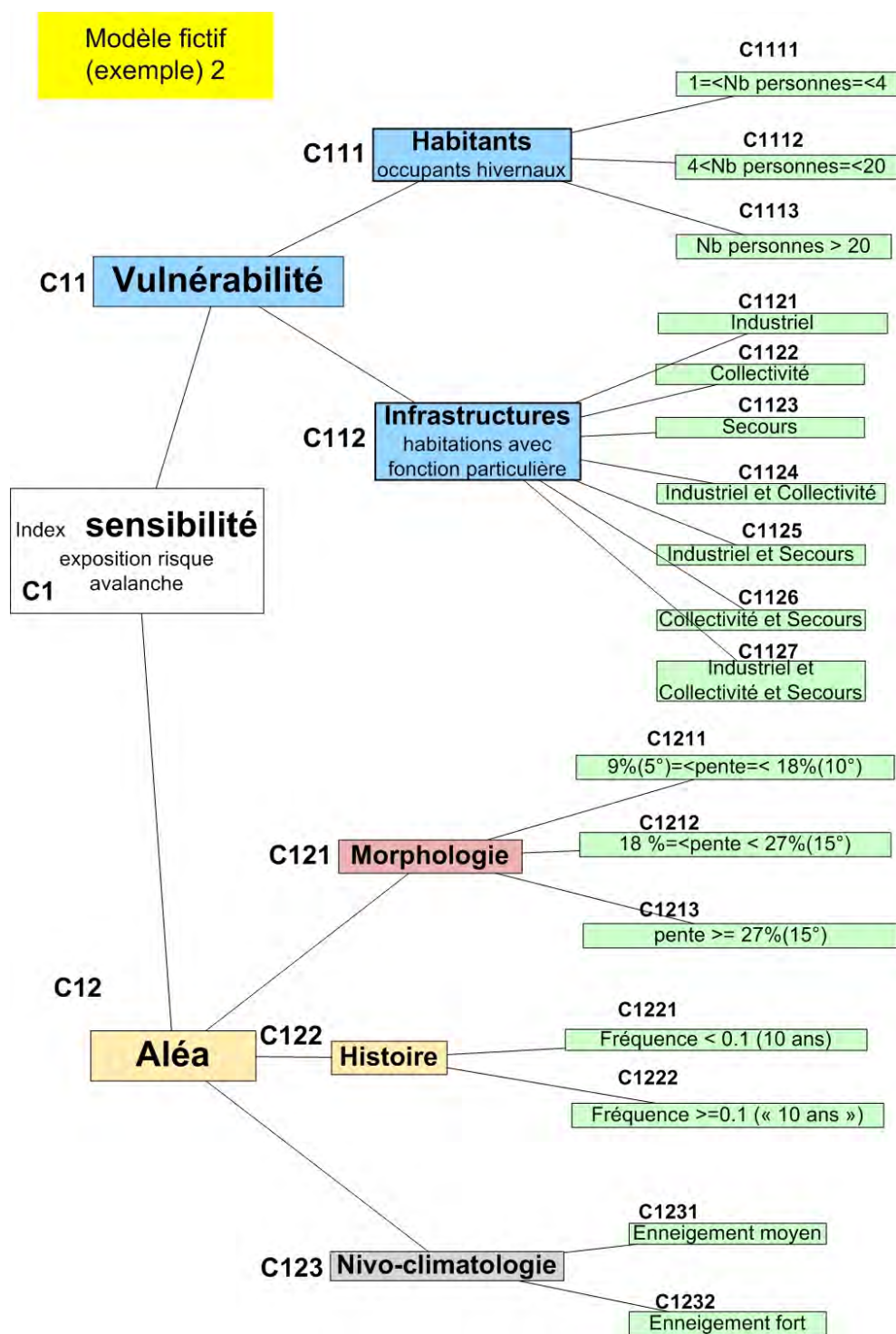


FIGURE G.9 – Arbre hiérarchique simplifié correspondant au modèle fictif (ou simplifié) n° 2

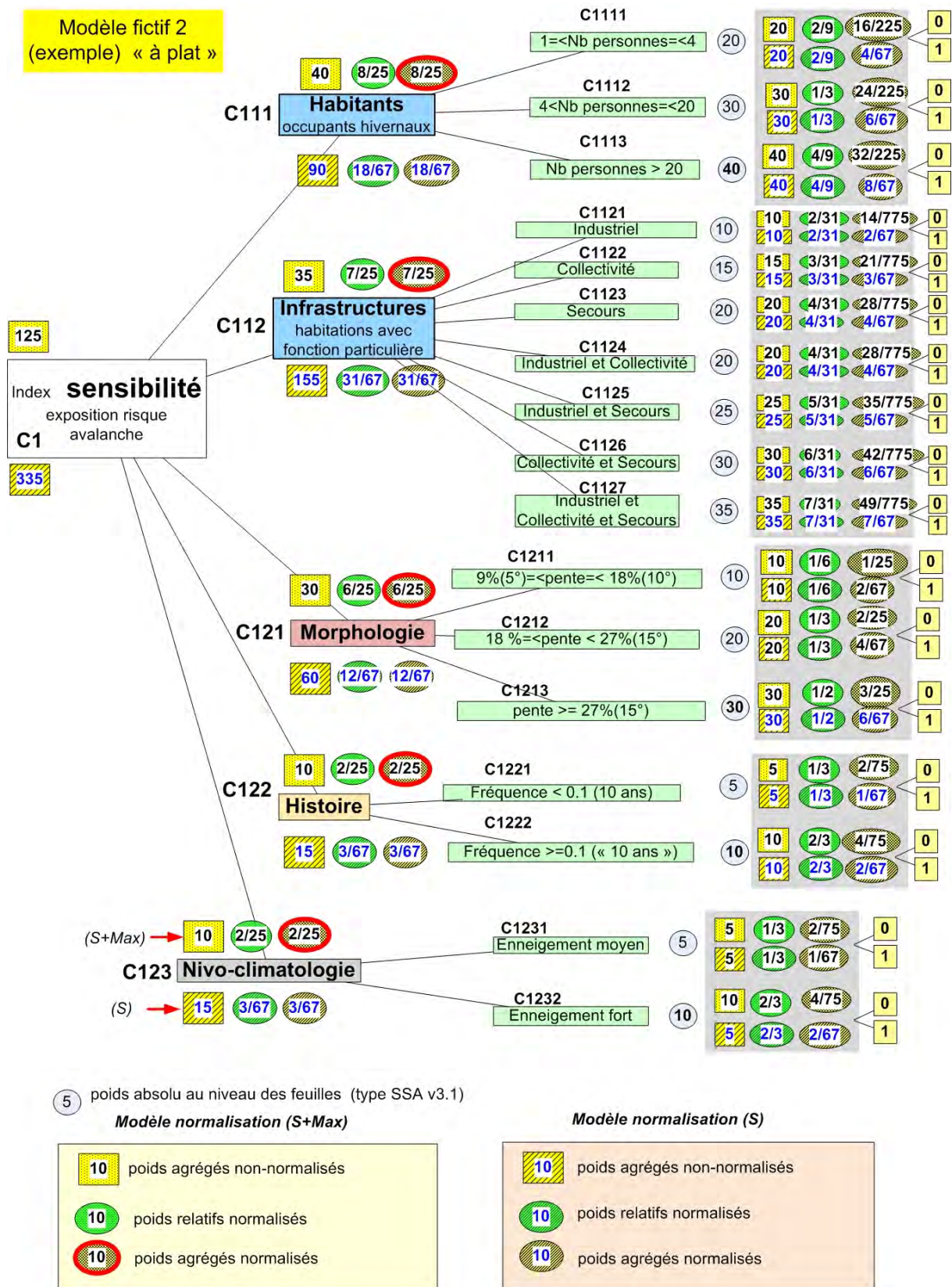


FIGURE G.10 – Modèle "à plat" correspondant au modèle fictif (ou simplifié) n° 2

ANNEXE G. RECONFIGURATION DE MODÈLES DE DÉCISION HIÉRARCHIQUE

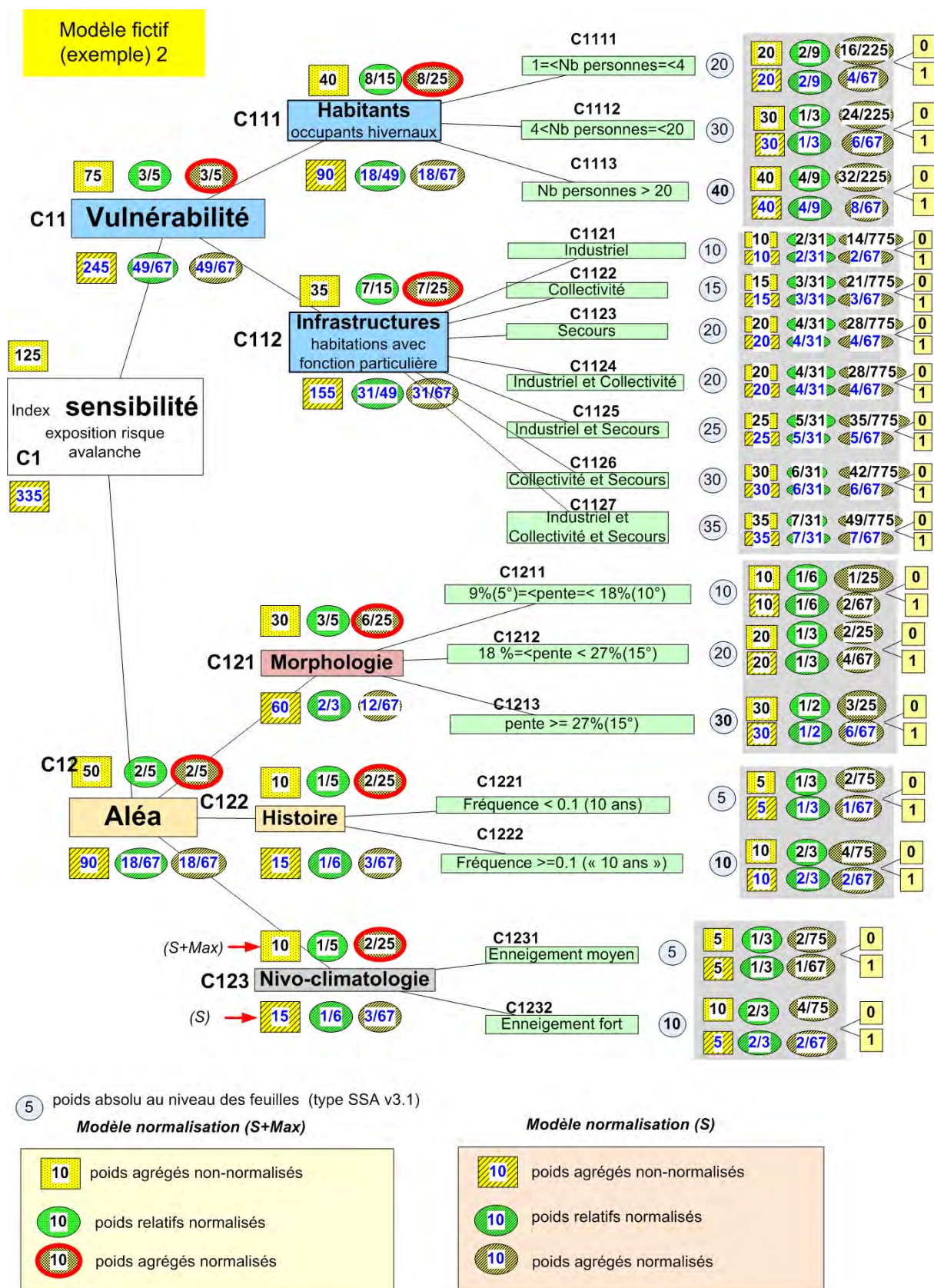


FIGURE G.11 – Modèle hiérarchique normalisé correspondant au modèle fictif (ou simplifié) n° 2

G.3. MODÈLE EXEMPLE 2

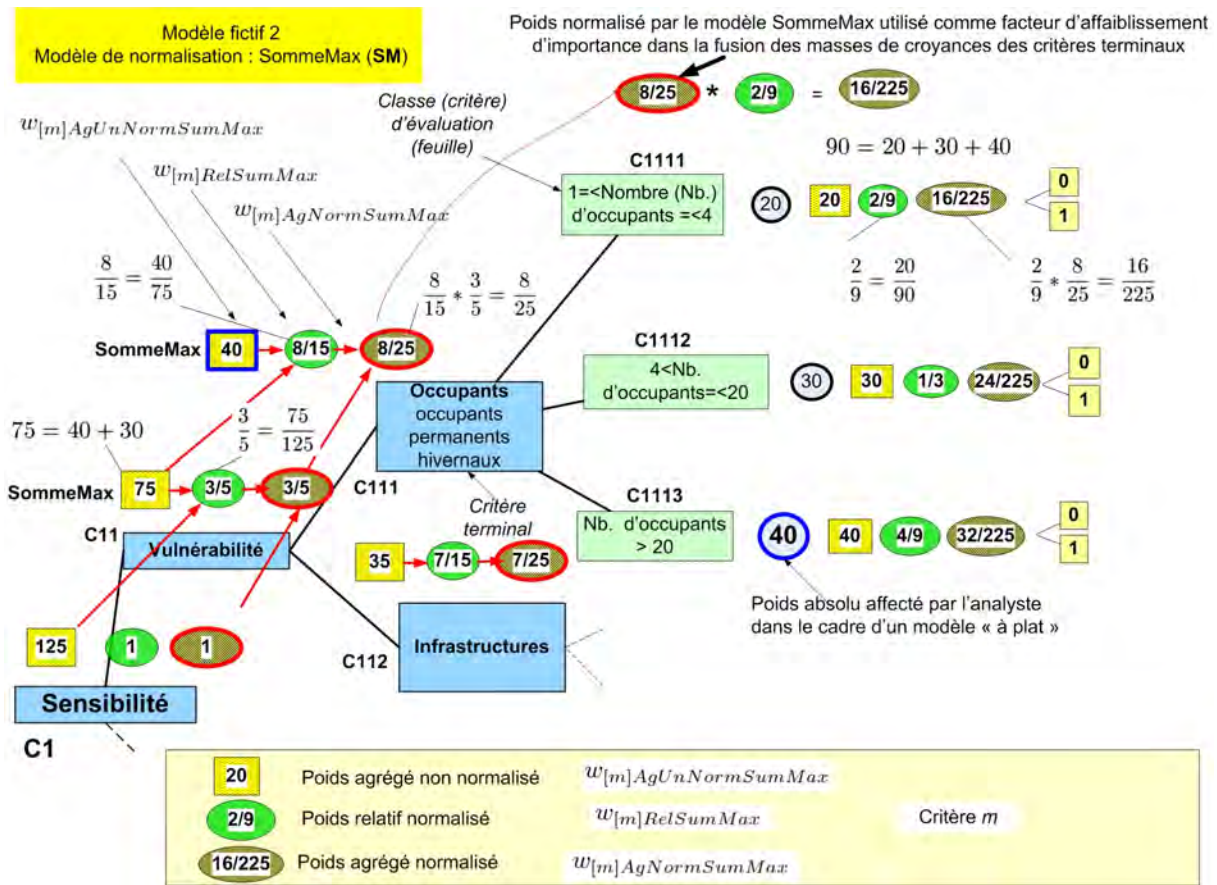


FIGURE G.12 – Principe et détail du calcul de normalisation selon le modèle SommeMax - modèle fictif (ou simplifié) n° 2

ANNEXE G. RECONFIGURATION DE MODÈLES DE DÉCISION HIÉRARCHIQUE

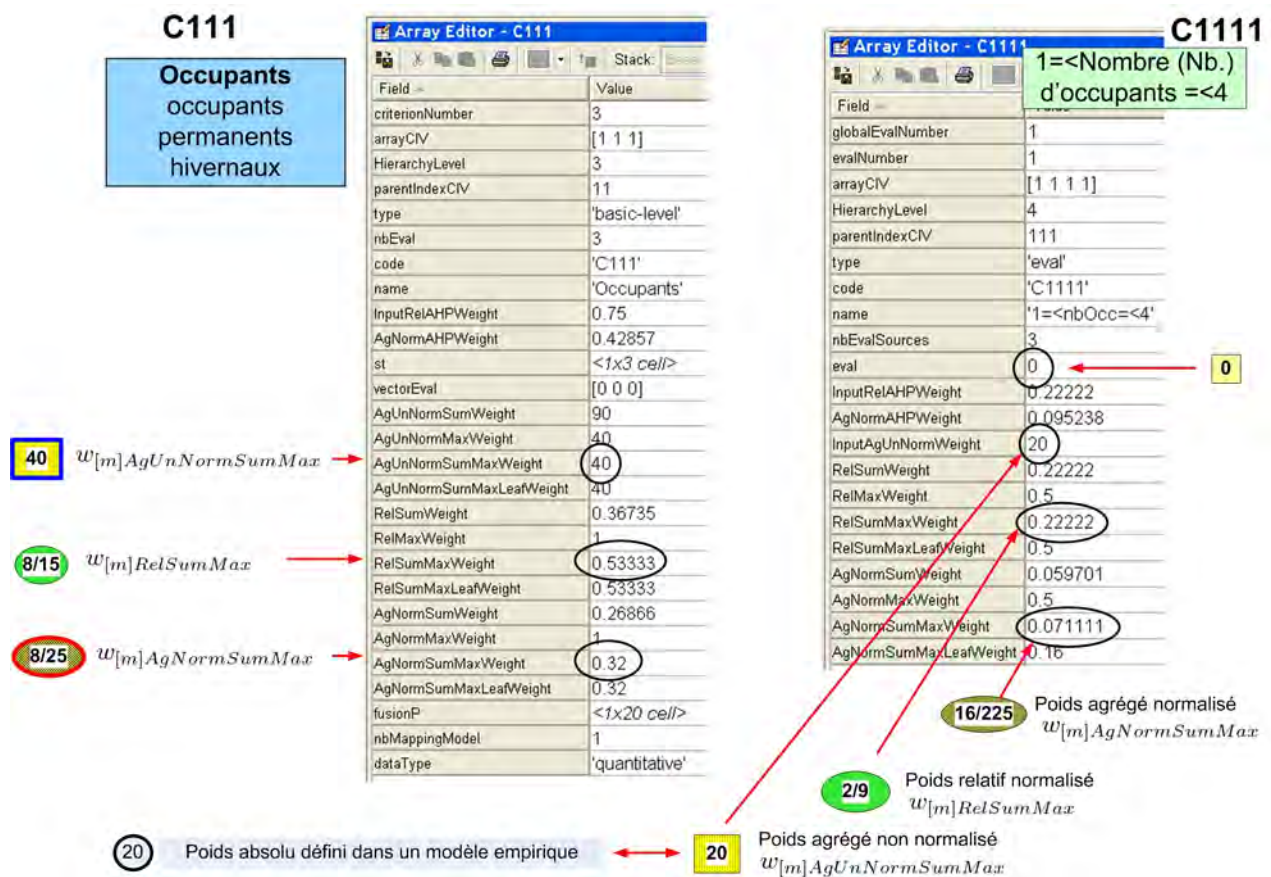


FIGURE G.13 – Implémentation du calcul de normalisation selon le modèle SommeMax - modèle fictif (ou simplifié) n° 2 - critères C1111 et C111

Sensibilité

C1

Array Editor - C1	
Field	Value
HierarchyLevel	1
code	'C1'
name	'AvalancheRiskExposureSensitivity'
type	'root'
treeDepth	4
arrayCIV	1
modelName	'SampleModel2_AHP'
criterionNumber	1
nbSubCriteria	2
RelAHPWeight	1
AgNormAHPWeight	1
st	<1x2 cell>
criteriaTotalNumber	8
basicLevelCriteriaTotalNumber	5
evaluationGradeTotalNumber	17
AgUnNormSumWeight	335
AgUnNormMaxWeight	40
AgUnNormSumMaxWeight	125
AgUnNormSumMaxLeafWeight	125
AgNormSumWeight	1
AgNormMaxWeight	1
AgNormSumMaxWeight	1
AgNormSumMaxLeafWeight	1
fusionP	<1x20 cell>
stateFusionProcess	<1x20 cell>

125

1

1

C11 Vulnérabilité

C11

Array Editor - C11	
Field	Value
criterionNumber	2
arrayCIV	[1 1]
HierarchyLevel	2
parentIndexCIV	1
type	'medium-level'
nbSubCriteria	2
code	'C11'
name	'Vulnerability'
InputRelAHPWeight	0.57143
AgNormAHPWeight	0.57143
st	<1x2 cell>
AgUnNormSumWeight	245
AgUnNormMaxWeight	40
AgUnNormSumMaxWeight	75
AgUnNormSumMaxLeafWeight	75
RelSumWeight	0.73134
RelMaxWeight	1
RelSumMaxWeight	0.6
RelSumMaxLeafWeight	0.6
AgNormSumWeight	0.73134
AgNormMaxWeight	1
AgNormSumMaxWeight	0.6
AgNormSumMaxLeafWeight	0.6
fusionP	<1x20 cell>

75

3/5

3/5

FIGURE G.14 – Implémentation du calcul de normalisation selon le modèle SommeMax - modèle fictif (ou simplifié) n° 2 - critères C1 et C11

ANNEXE G. RECONFIGURATION DE MODÈLES DE DÉCISION
HIÉRARCHIQUE

Annexe H

Modèles hiérarchiques : Sites Sensibles Avalanches (*SSA*)

H.1 Sites sensibles avalanches - Configuration actuelle

Cette annexe regroupe les schémas correspondant à la représentation hiérarchique arborescente du dispositif "Sites sensibles avalanches" dans sa configuration actuelle.

ANNEXE H. MODÈLES HIÉRARCHIQUES : SITES SENSIBLES AVALANCHES (SSA)

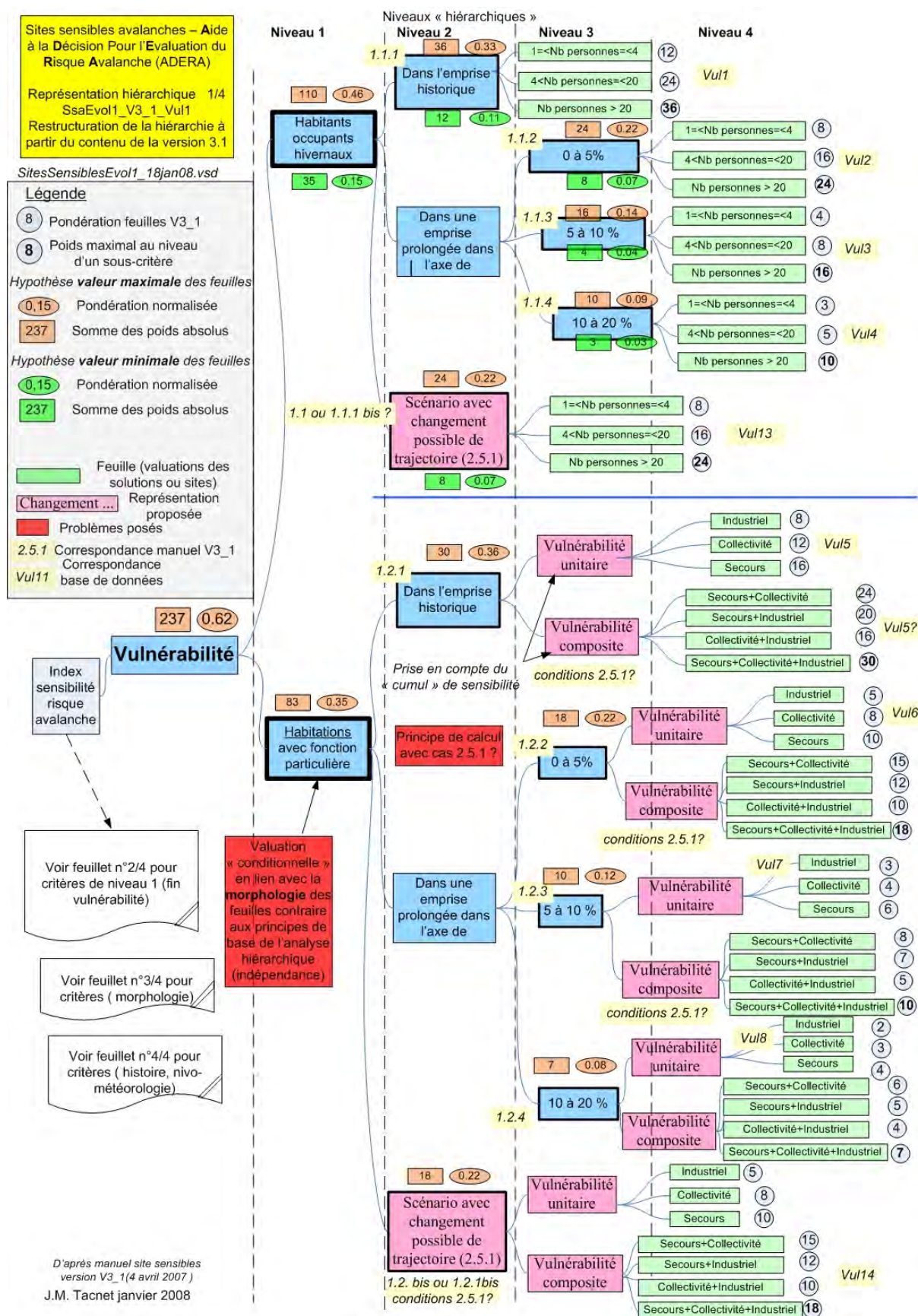


FIGURE H.1 – Sites sensibles avalanches version actuelle - Vulnérabilité partie 1/2

H.1. SITES SENSIBLES AVALANCHES - CONFIGURATION ACTUELLE

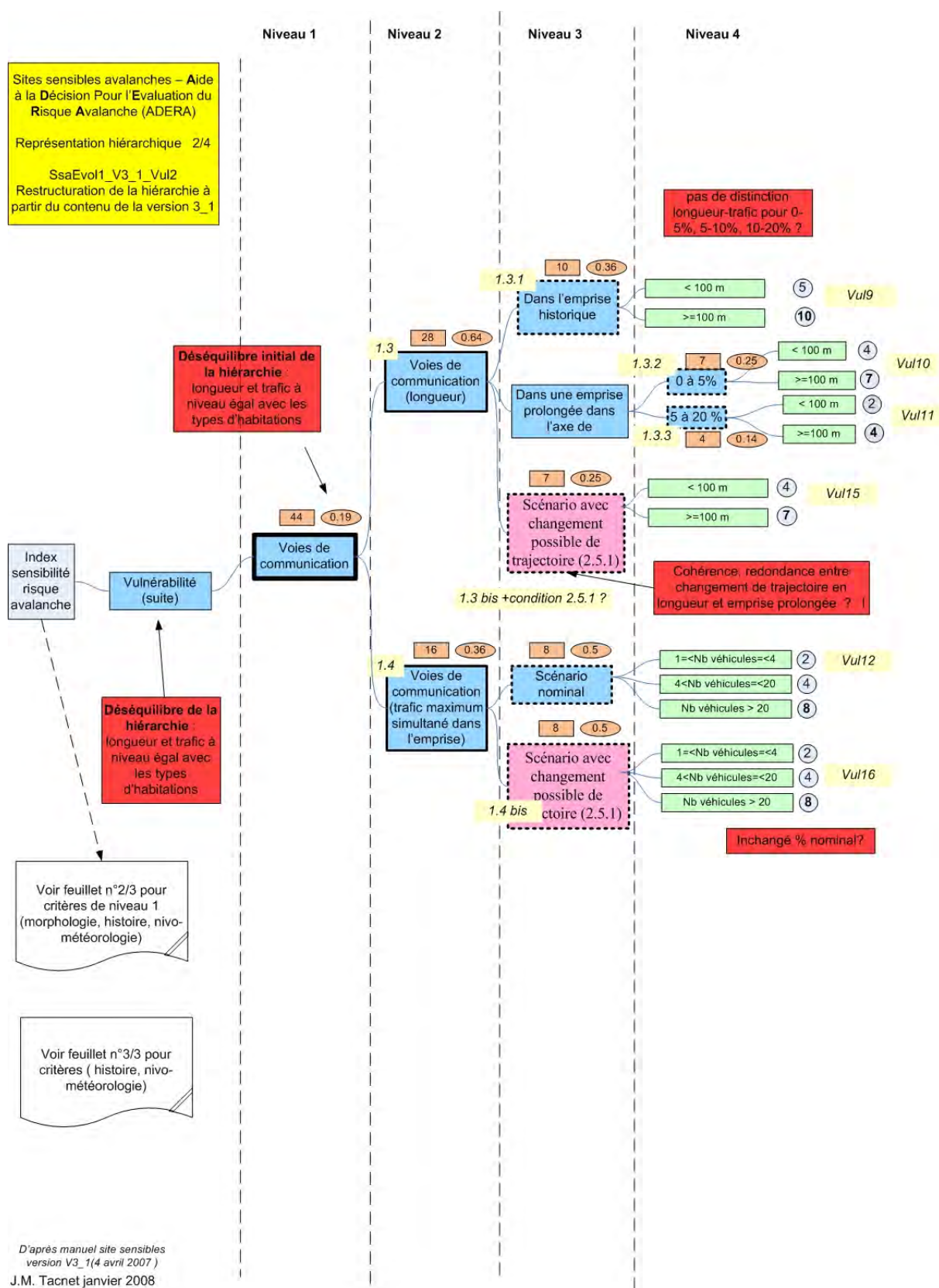


FIGURE H.2 – Sites sensibles avalanches version actuelle - Vulnérabilité partie 2/2

ANNEXE H. MODÈLES HIÉRARCHIQUES : SITES SENSIBLES AVALANCHES (SSA)

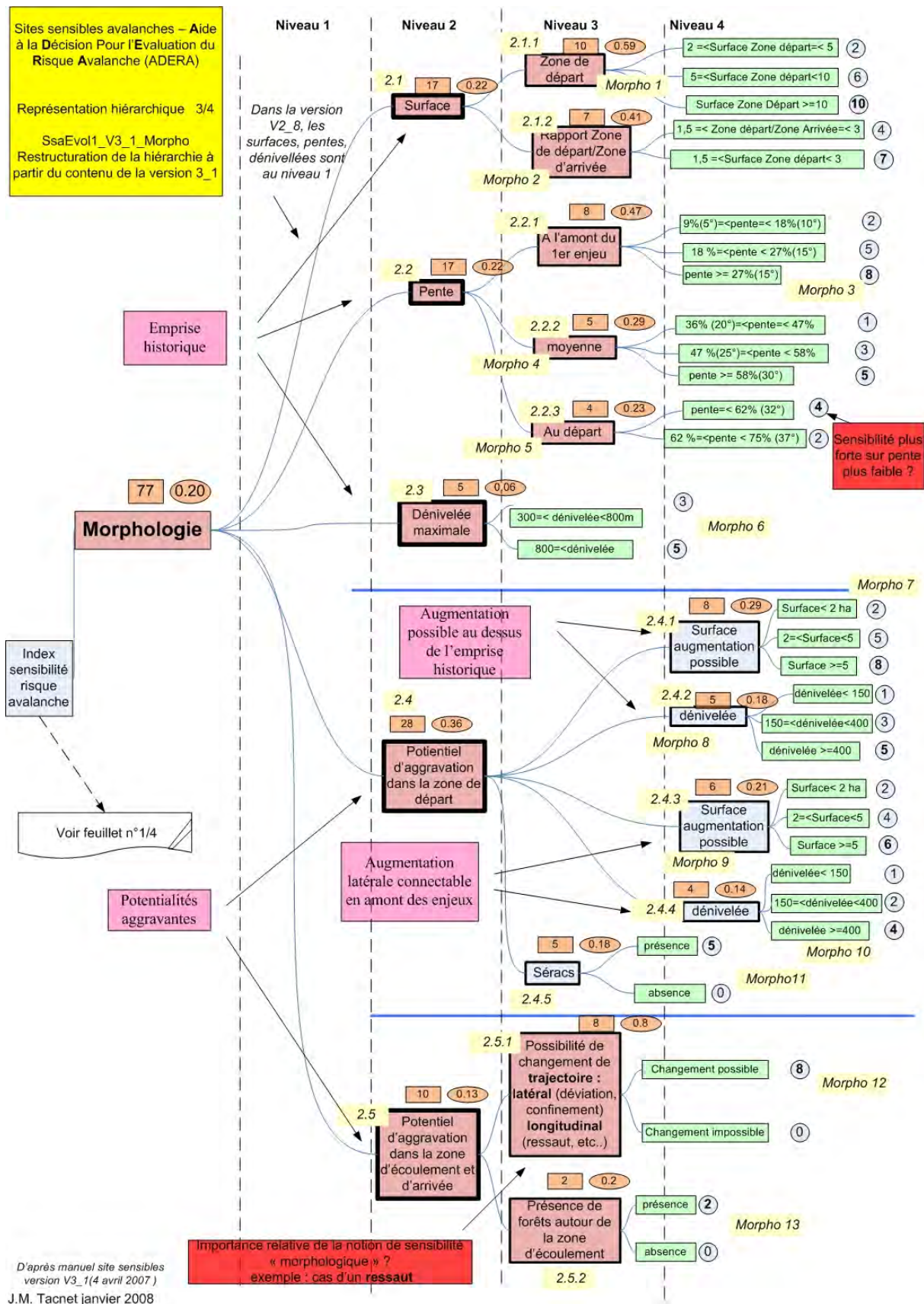


FIGURE H.3 – Sites sensibles avalanches version actuelle - Morphologie

H.1. SITES SENSIBLES AVALANCHES - CONFIGURATION ACTUELLE

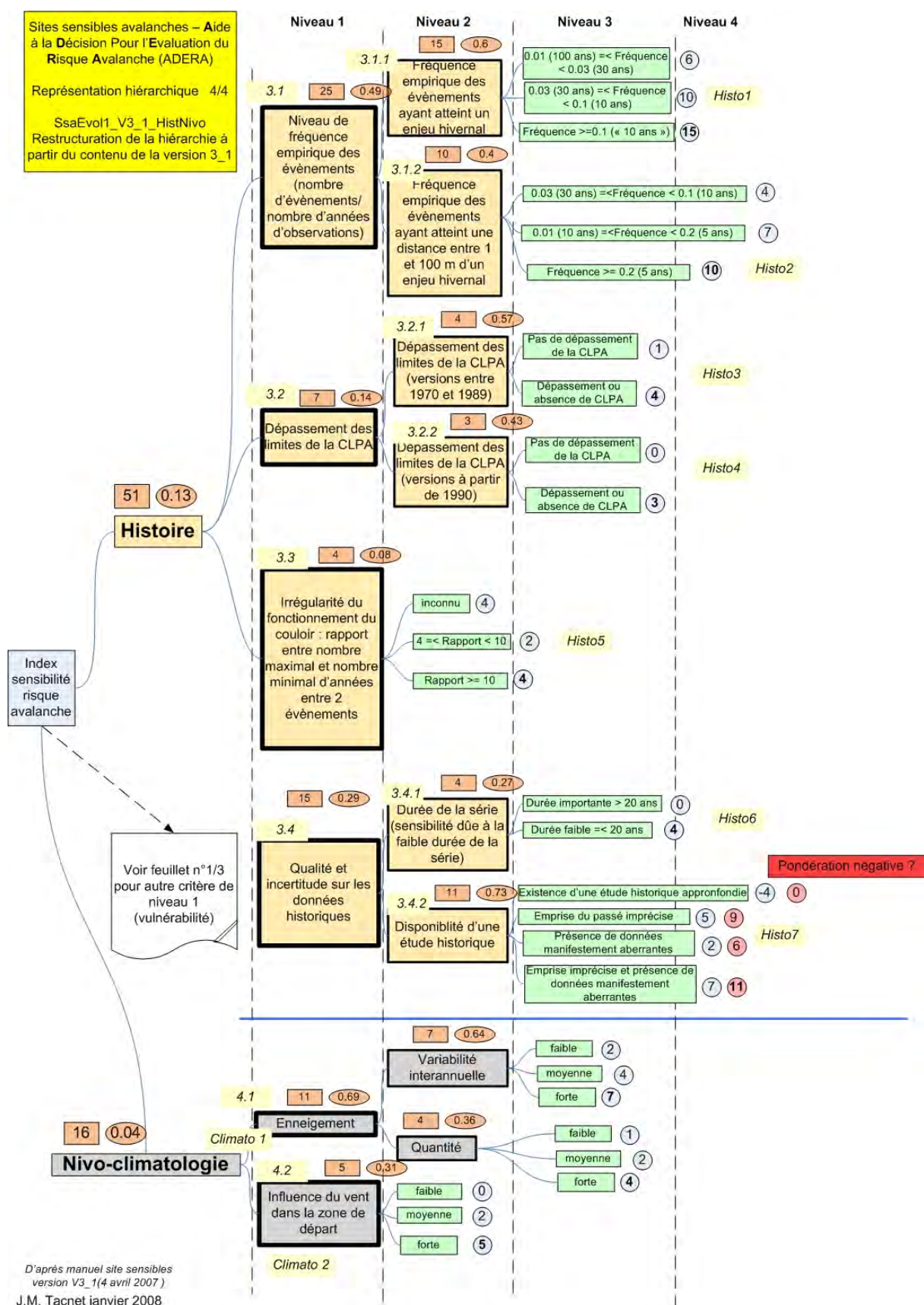


FIGURE H.4 – Sites sensibles avalanches version actuelle - Histoire et Nivo-météorologie

H.2 Sites sensibles avalanches - Evolution par scénarios

Cette annexe regroupe les schémas correspondant à la représentation hiérarchique arborescente du dispositif "Sites sensibles avalanches" en restructurant les critères pour mettre en évidence la notion de scénarios.

H.2. SITES SENSIBLES AVALANCHES - EVOLUTION PAR SCÉNARIOS

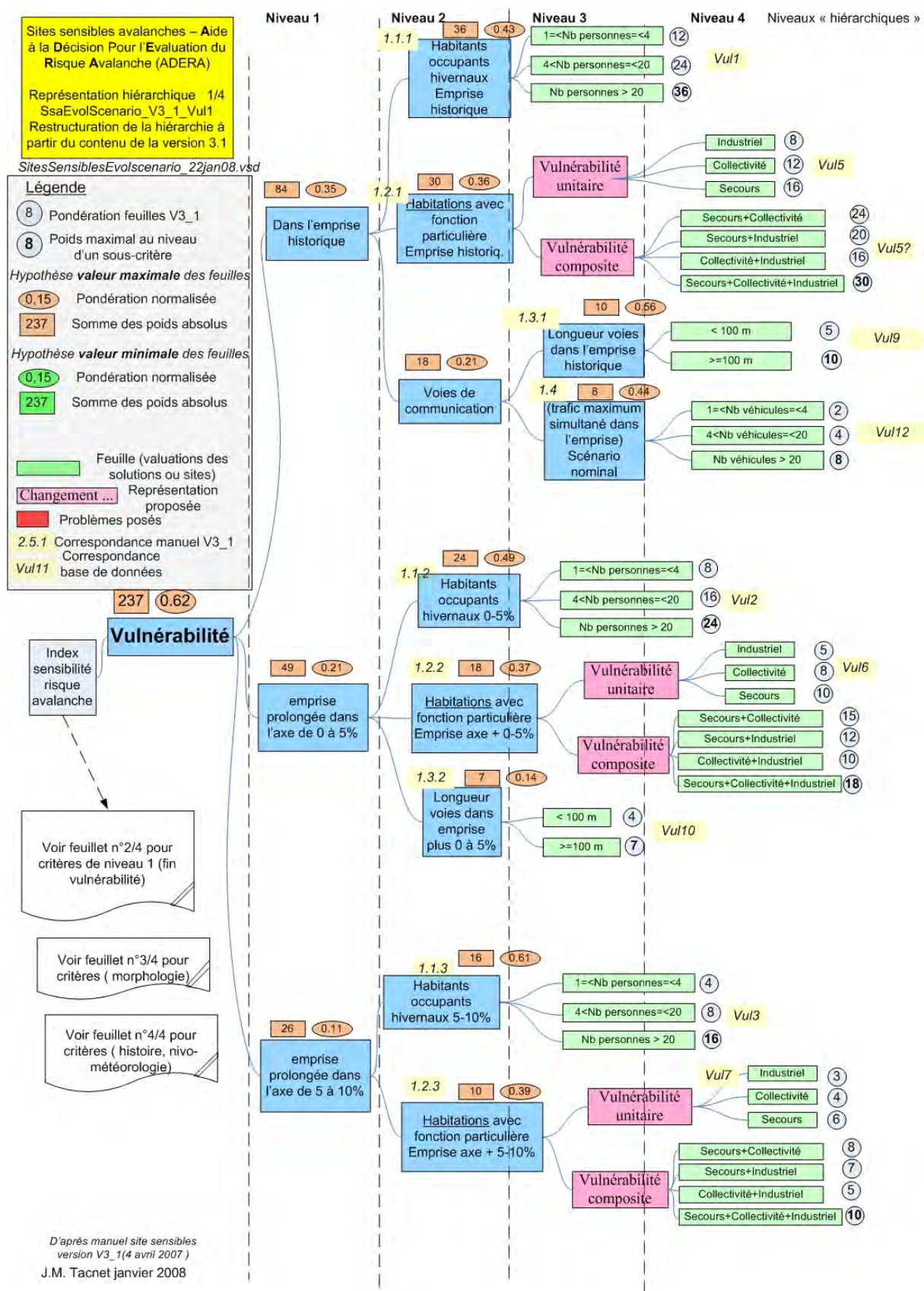


FIGURE H.5 – Sites sensibles avalanches approche par scénarios - Vulnérabilité partie 1/2

ANNEXE H. MODÈLES HIÉRARCHIQUES : SITES SENSIBLES AVALANCHES (SSA)

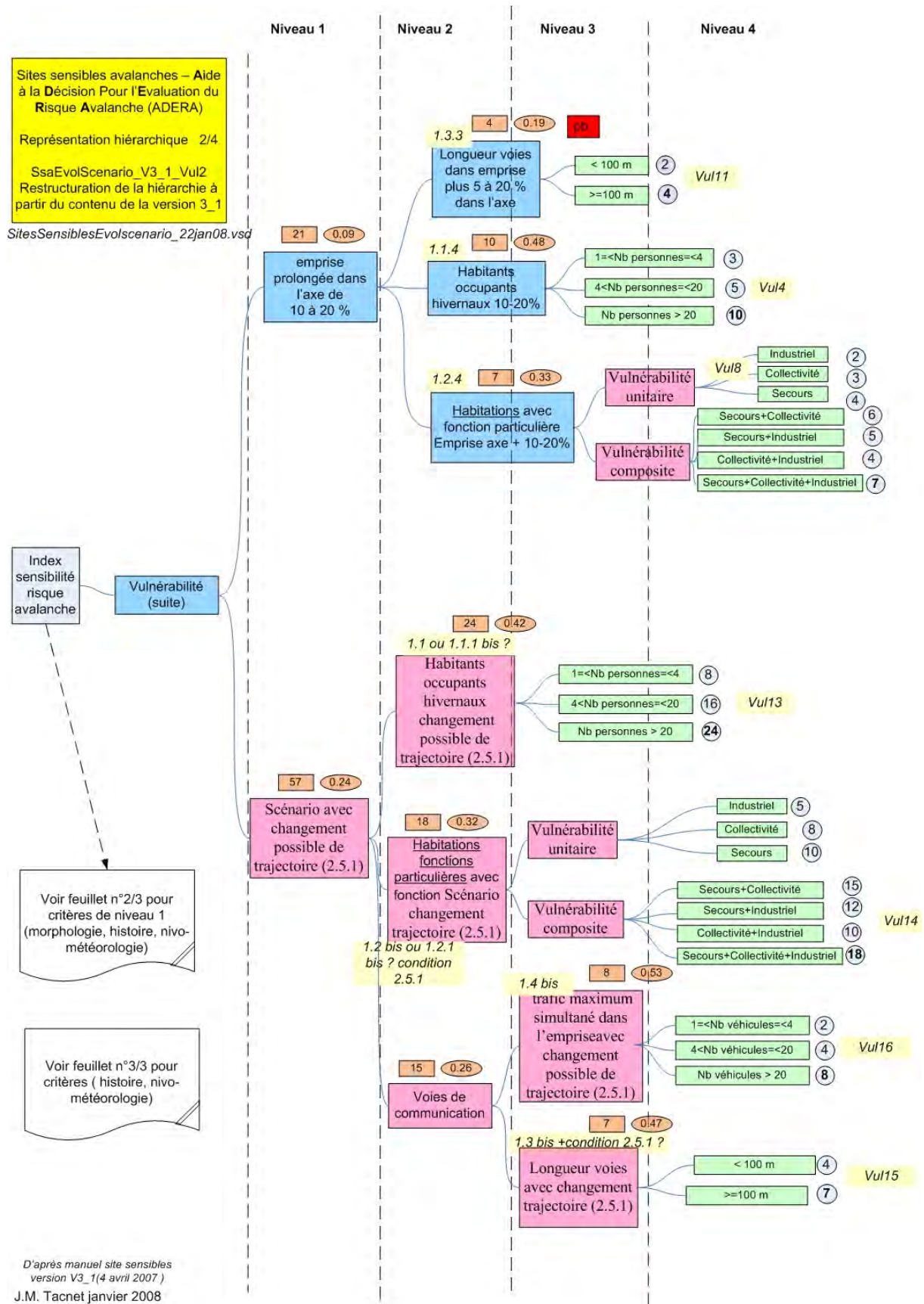


FIGURE H.6 – Sites sensibles avalanches approche par scénarios - Vulnérabilité partie 2/2

H.2. SITES SENSIBLES AVALANCHES - EVOLUTION PAR SCÉNARIOS

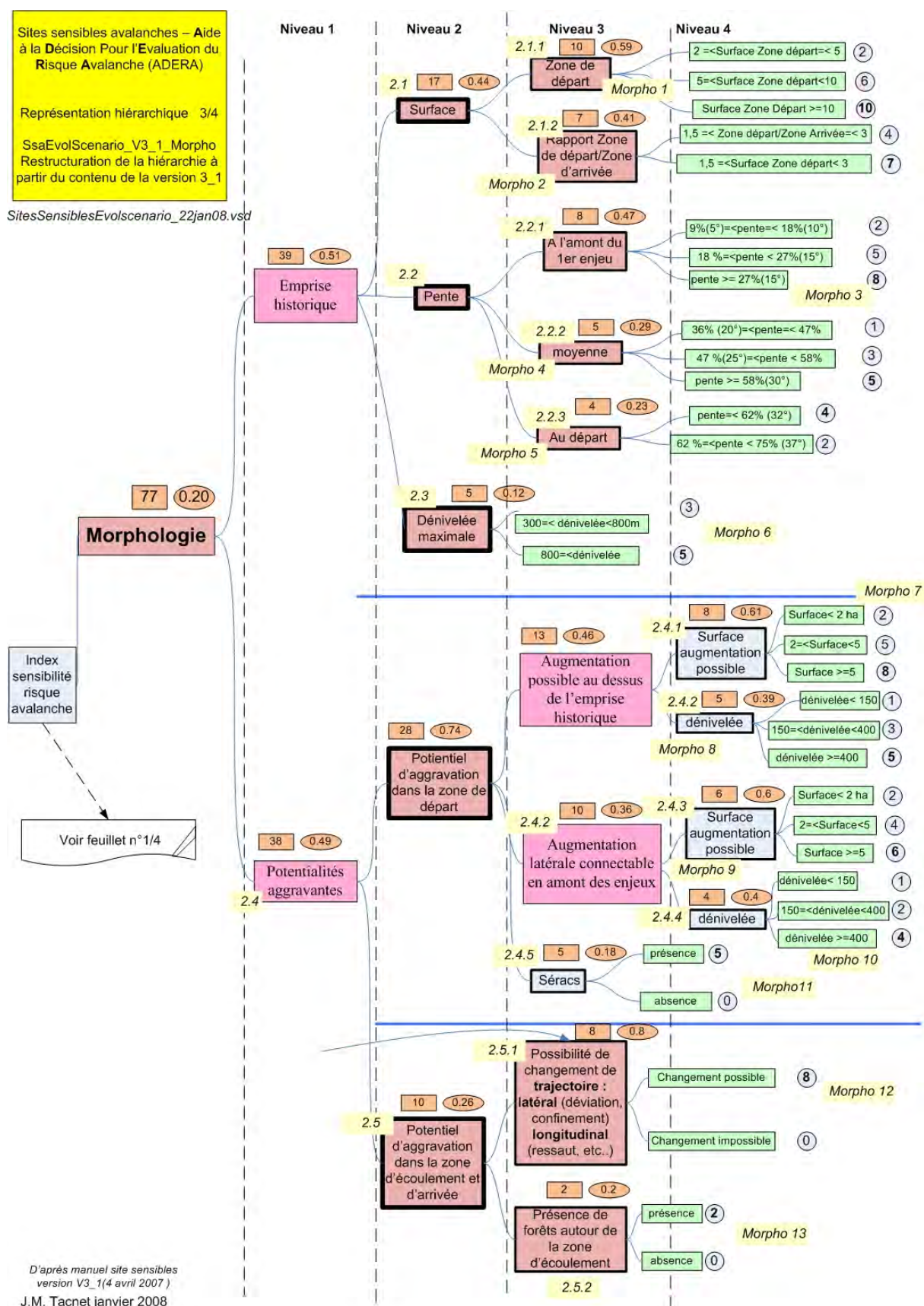


FIGURE H.7 – Sites sensibles avalanches approche par scénarios - Morphologie

ANNEXE H. MODÈLES HIÉRARCHIQUES : SITES SENSIBLES AVALANCHES (SSA)

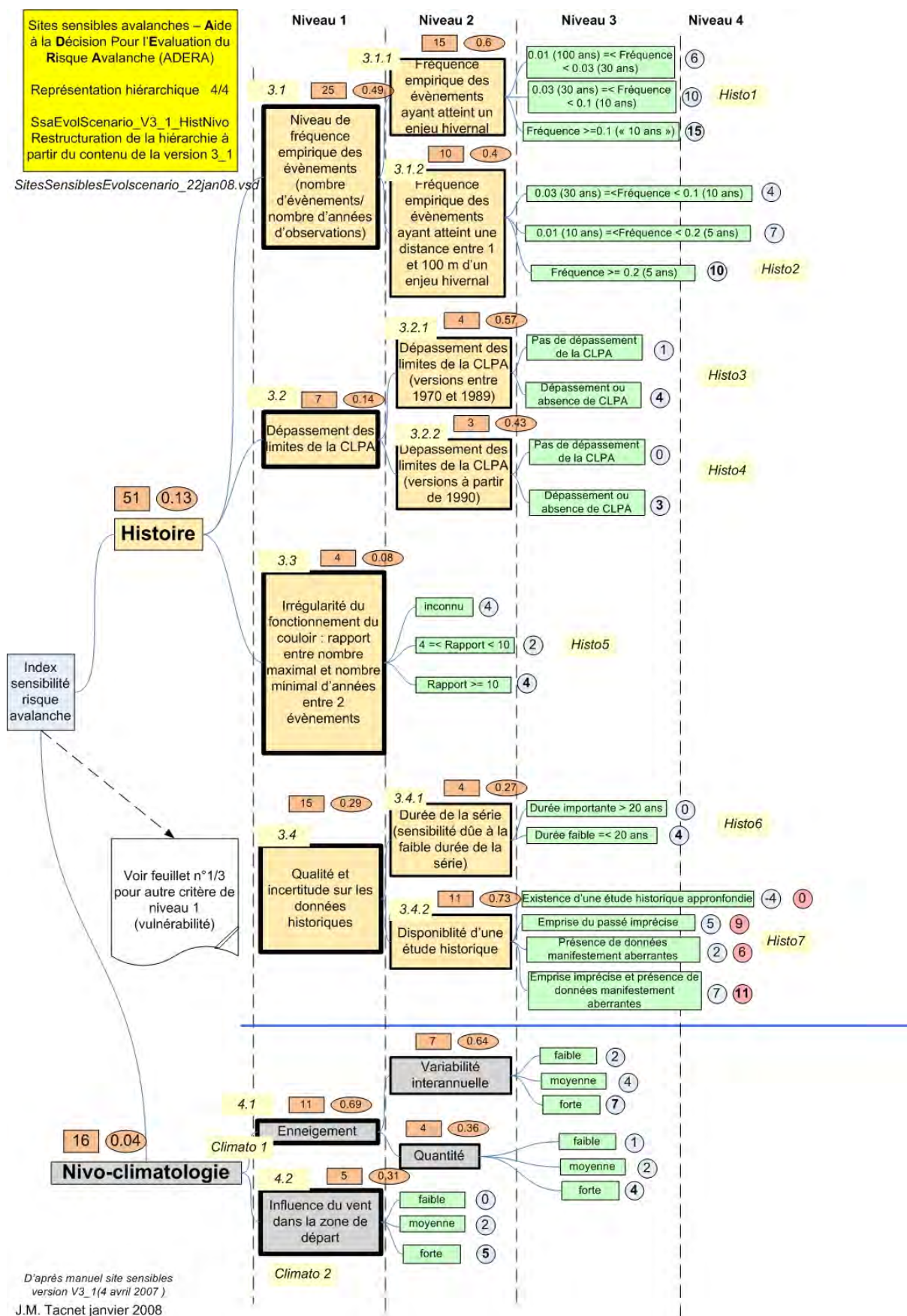


FIGURE H.8 – Sites sensibles avalanches approche par scénarios - Histoire et nivo-météorologie

Annexe I

Méthodologie *ER-MCDA* : compléments de résultats

Introduction

Cette annexe constitue un complément à la description de l'application de la méthodologie *ER-MCDA* décrite en 9)(p. 223). Elle présente essentiellement sous forme graphique :

- les modèles de transposition et les données d'évaluation des critères quantitatifs relatifs à la morphologie, l'histoire et la nivo-climatologie ;
- les hypothèses relatives aux processus de fusion étudiés et non présentés dans le cadre de ce travail.

I.1 Evaluation et modèle de transposition

I.1.1 Critère Morphologie $C_{[121]}$

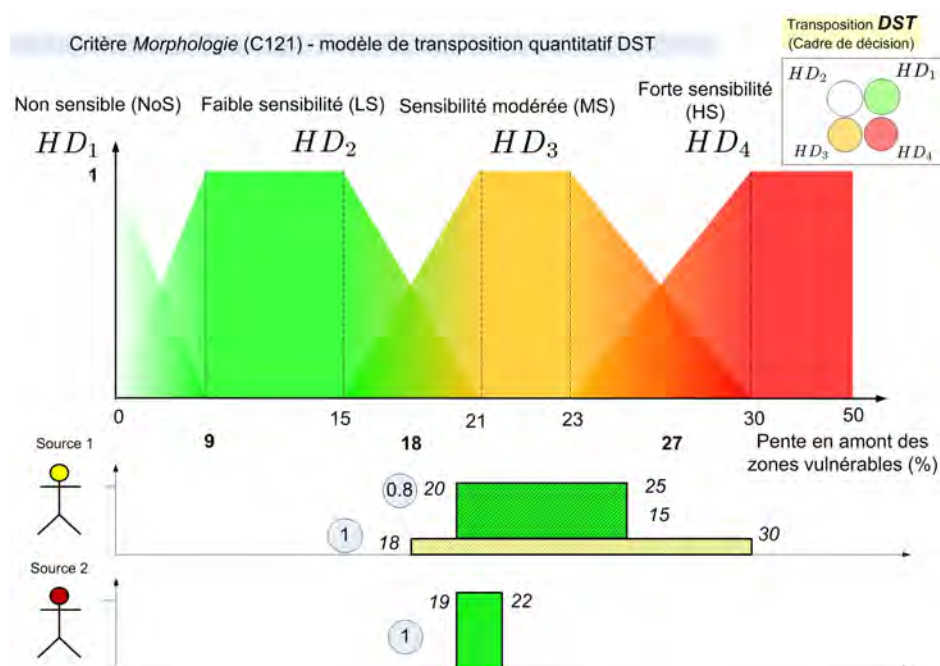


FIGURE I.1 – Modèle de transposition (*DST*) qualitatif du critère $C_{[121]}$ (Morphologie) et intervalles d'évaluation (*DST*) des sources 1 et 2

I.1.2 Critère Histoire $C_{[122]}$

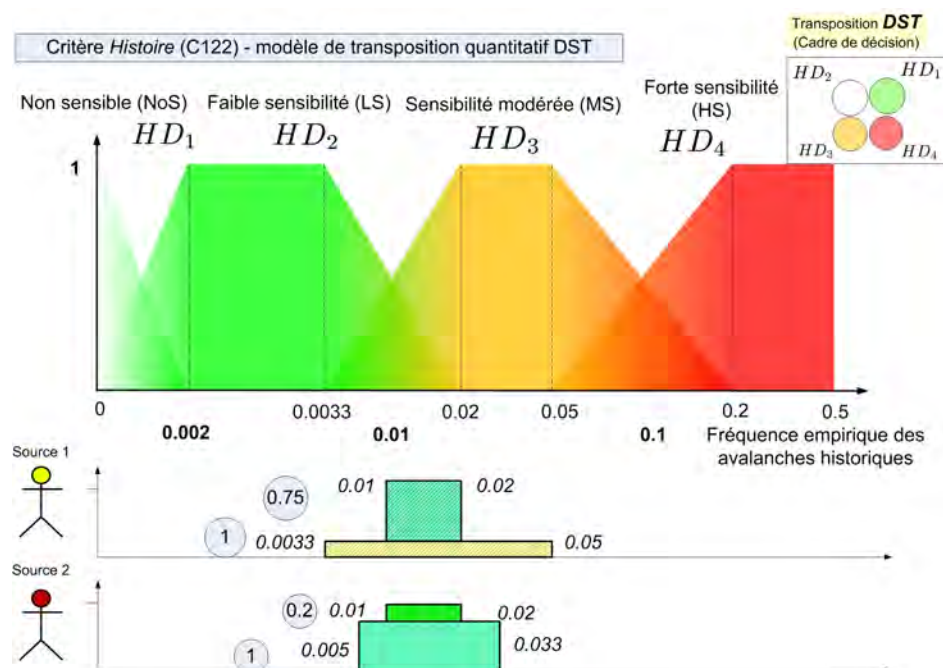


FIGURE I.2 – Modèle de transposition (*DST*) qualitatif du critère $C_{[122]}$ (Histoire) et intervalles d'évaluation (*DST*) des sources 1 et 2

I.1.3 Critère Nivo-climatologie $C_{[123]}$

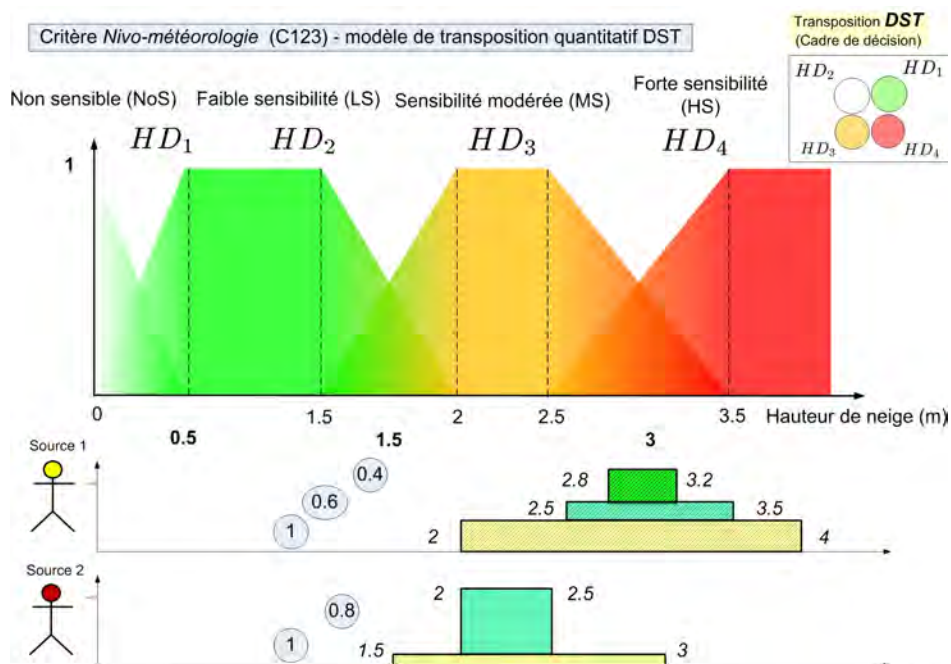


FIGURE I.3 – Modèle de transposition (*DST*) qualitatif du critère $C_{[123]}$ (Nivo-climatologie) et intervalles d'évaluation (*DST*) des sources 1 et 2

I.2 Description des processus de fusion

Les 2 tableaux correspondent respectivement aux mêmes processus de fusion à l'exception du choix de la théorie *DST* et *DSmT*. Les processus de fusion numérotés de 1 à 6 et 13,14 correspondent à un cadre de discernement de décision basé sur la *DST*. Les processus de fusion numérotés de 7 à 12 et 15,16 correspondent à un cadre de discernement de décision basé sur la *DSmT*. Pour toutes les simulations, les sources et les évaluations sont les mêmes, on ne fait varier uniquement les modèles d'évaluation qualitative et les règles de fusion. Ainsi, on peut comparer les résultats dans un contexte associé à la *DST* et à la *DSmT*. Les couples de processus de fusion sont donc :

- n°1 - n°7 ;
- n°2 - n°8 ;
- n°3 - n°9 ;
- n°4 - n°10 ;
- n°5 - n°11 ;
- n°6 - n°12 ;
- n°13 - n°15 ;
- n°14 - n°16 ;

I.2.1 Processus basés sur un cadre *DST*

Processus de fusion	Nombre	1	2	3	4	5	6	13	14
	Nom	Processus de fusion 1	Processus de fusion 2	Processus de fusion 3	Processus de fusion 4	Processus de fusion 5	Processus de fusion 6	Processus de fusion 13	Processus de fusion 14
Raisonnement crédibiliste (ER)	Cadre de discernement de décision	Non Sensible (NoS) - LowS (LS) - MediumS (MS) - HighS (HS)	Non Sensible (NoS) - LowS (LS) - MediumS (MS) - HighS (HS)	Non Sensible (NoS) - LowS (LS) - MediumS (MS) - HighS (HS)	Non Sensible (NoS) - LowS (LS) - MediumS (MS) - HighS (HS)	Non Sensible (NoS) - LowS (LS) - MediumS (MS) - HighS (HS)	Non Sensible (NoS) - LowS (LS) - MediumS (MS) - HighS (HS)	Non Sensible (NoS) - LowS (LS) - MediumS (MS) - HighS (HS)	Non Sensible (NoS) - LowS (LS) - MediumS (MS) - HighS (HS)
	cardTheta	4	4	4	4	4	4	4	4
	Théorie (Fonctions de croyance)	DST	DST	DST	DST	DST	DST	DST	DST
Affaiblissement des critères et des évaluations	Mode d'affaiblissement des évaluations	Evaluations affaiblies	Evaluations affaiblies	Evaluations affaiblies	Evaluations affaiblies	Evaluations non affaiblies	Evaluations affaiblies	Evaluations non affaiblies	Evaluations non affaiblies
	Mode d'affaiblissement des critères terminaux	Critère terminal affaibli : modèle SommeMax	Critère terminal affaibli : modèle SommeMax	Critère terminal affaibli : modèle SommeMax	Critère terminal affaibli : modèle SommeMax	Critère terminal affaibli : modèle SommeMax	Critère terminal affaibli : modèle SommeMax	Critère terminal affaibli : modèle SommeMax	Critère terminal affaibli : modèle SommeMax
Modèles de transposition et d'évaluation	type du modèle de transposition ("mapping")	DST	DST	DST	DST	DST	DST	DST	DST
	Modèle d'évaluation (pour les critères qualitatifs) ("Scaling")	DST	DST	DST	DST	DST	DST	DST	DST
Paramètres de la fusion	Règle de fusion	DST (Dempster normalisée)	Smets	PCR8	PCR8	PCR8	PCR8	DST (Dempster normalisée)	Smets
	Mode de fusion	Statique	Statique	Statique	Statique	Statique	Statique	Statique	Statique
	Ordre de fusion	(+Crit(+Src-Eval))	(+Crit(+Src-Eval))	(+Crit(+Src-Eval))	(+Crit(+Src-Eval))	(+Crit(+Src-Eval))	(+Crit(+Src-Eval))	(+Crit(+Src-Eval))	(+Crit(+Src-Eval))
Décision	Cadre de calcul	A. Martin © 2008	A. Martin © 2008	A. Martin © 2008	A. Martin © 2008	A. Martin © 2008	A. Martin © 2008	A. Martin © 2008	A. Martin © 2008
	Règle de décision	Maximum probabilité pignistique	Maximum probabilité pignistique	Maximum probabilité pignistique	Maximum probabilité pignistique	Maximum probabilité pignistique	Maximum probabilité pignistique	Maximum probabilité pignistique	Maximum probabilité pignistique
	Élément de décision	Singletons	Singletons	Singletons	Singletons	Singletons	Singletons	Singletons	Singletons
	Mode d'affichage	Combinaison et Decision	Combinaison et Decision	Combinaison et Decision	Combinaison et Decision	Combinaison et Decision	Combinaison et Decision	Combinaison et Decision	Combinaison et Decision

FIGURE I.5 – Synthèse des hypothèses des processus de fusion basés un modèle de transposition *DST*

I.2.2 Processus basés sur un cadre *DSmT*

Processus de fusion	Nombre	7	8	9	10	11	12	15	16	17
	Norm	Processus de fusion 7	Processus de fusion 8	Processus de fusion 9	Processus de fusion 10	Processus de fusion 11	Processus de fusion 12	Processus de fusion 15	Processus de fusion 16	Processus de fusion 17
Raisonnement credibiliste (ER)	Cadre de discernement de décision cardTheta	Non sensible (NoS) - Lows (LS) - Highs (HS) 3	Non sensible (NoS) - Lows (LS) - Highs (HS) 3	Non sensible (NoS) - Lows (LS) - Highs (HS) 3	Non sensible (NoS) - Lows (LS) - Highs (HS) 3	Non sensible (NoS) - Lows (LS) - Highs (HS) 3	Non sensible (NoS) - Lows (LS) - Highs (HS) 3	Non sensible (NoS) - Lows (LS) - Highs (HS) 3	Non sensible (NoS) - Lows (LS) - Highs (HS) 3	Non sensible (NoS) - Lows (LS) - Highs (HS) 3
Affaiblissement des critères et des évaluations	Théorie (Fonctions de croyance)	DSmT	DSmT	DSmT	DSmT	DSmT	DSmT	DSmT	DSmT	DSmT
	Mode d'affaiblissement des évaluations	Evaluations affaiblies	Evaluations affaiblies	Evaluations affaiblies	Evaluations affaiblies	Evaluations non affaiblies	Evaluations affaiblies	Evaluations non affaiblies	Evaluations non affaiblies	Evaluations non affaiblies
Modèles de transposition et d'évaluation	Mode d'affaiblissement des critères terminaux	Critère terminal affaibli : modèle SommeMax	Critère terminal affaibli : modèle SommeMax	Critère terminal affaibli : modèle SommeMax	Critère terminal affaibli : modèle SommeMax	Critère terminal affaibli : modèle SommeMax	Critère terminal affaibli : modèle SommeMax	Critère terminal affaibli : modèle SommeMax	Critère terminal affaibli : modèle SommeMax	Critère terminal affaibli : modèle SommeMax
	type du modèle de transposition ("mapping")	DSmT	DSmT	DSmT	DSmT	DSmT	DSmT	DSmT	DSmT	DSmT
	Modèle d'évaluation (pour les critères qualitatifs) ("Scaling")	DSmT	DSmT	DSmT	DSmT	DSmT	DSmT	DSmT	DSmT	DSmT
Paramètres de la fusion	Règle de fusion	DST (Dempster normalisée)	DST	DST	DSmT	DST	DST	DST	DST	DST
	Mode de fusion	Statique	Smets	PCR6	PCR6	PCR6	PCR6	DST (Dempster normalisée)	Smets	PCR6
	Ordre de fusion	(+Crit(+Src-Eval))	(+Crit(+Src-Eval))	(+Crit(+Src-Eval))	(+Crit(+Src-Eval))	(+Crit(+Src-Eval))	(+Crit(+Src-Eval))	(+Crit(+Src-Eval))	(+Crit(+Src-Eval))	(+Crit(+Src-Eval))
	Cadre de calcul	A. Martin © 2008	A. Martin © 2008	A. Martin © 2008	A. Martin © 2008	A. Martin © 2008	A. Martin © 2008	A. Martin © 2008	A. Martin © 2008	A. Martin © 2008
Décision	Règle de décision	Maximum probabilité pignistique et éléments focaux	Maximum probabilité pignistique et éléments focaux	Maximum probabilité pignistique et éléments focaux	Maximum probabilité pignistique et éléments focaux	Maximum probabilité pignistique et éléments focaux	Maximum probabilité pignistique et éléments focaux	Maximum probabilité pignistique et éléments focaux	Maximum probabilité pignistique et éléments focaux	Maximum probabilité pignistique et éléments focaux
	Elément de décision	Combinaison et décision	Combinaison et décision	Combinaison et décision	Combinaison et décision	Combinaison et décision	Combinaison et décision	Combinaison et décision	Combinaison et décision	Combinaison et décision
	Mode d'affichage	Décision	Décision	Décision	Décision	Décision	Décision	Décision	Décision	Décision

FIGURE I.6 – Synthèse des hypothèses des processus de fusion basés sur un modèle de transposition *DSmT*

I.3 Développement d'un prototype

Les développements du modèle *ER-MCDA* concernent donc la structuration du modèle multicritères hiérarchique, la saisie et la transposition quantitative des évaluations des critères quantitatifs, la structuration des données pour la fusion (interfaçage entrées-sorties avec les routines précitées) et les sorties graphiques permettant la visualisation des résultats de la fusion. L'implémentation informatique sous forme d'un code développé sous Matlab® est décrite de manière plus détaillée en annexe. Cette application exploite des routines de calculs développées récemment (Martin, 2009) et qui permettent d'effectuer la fusion de jeux de masse de croyance dans les contextes de la *DST* et de la *DSmT*. En se limitant au seul aspect du calcul de fusion, seules les fonctions permettant d'affaiblir les sources (fiabilité et importance) ont été développées.

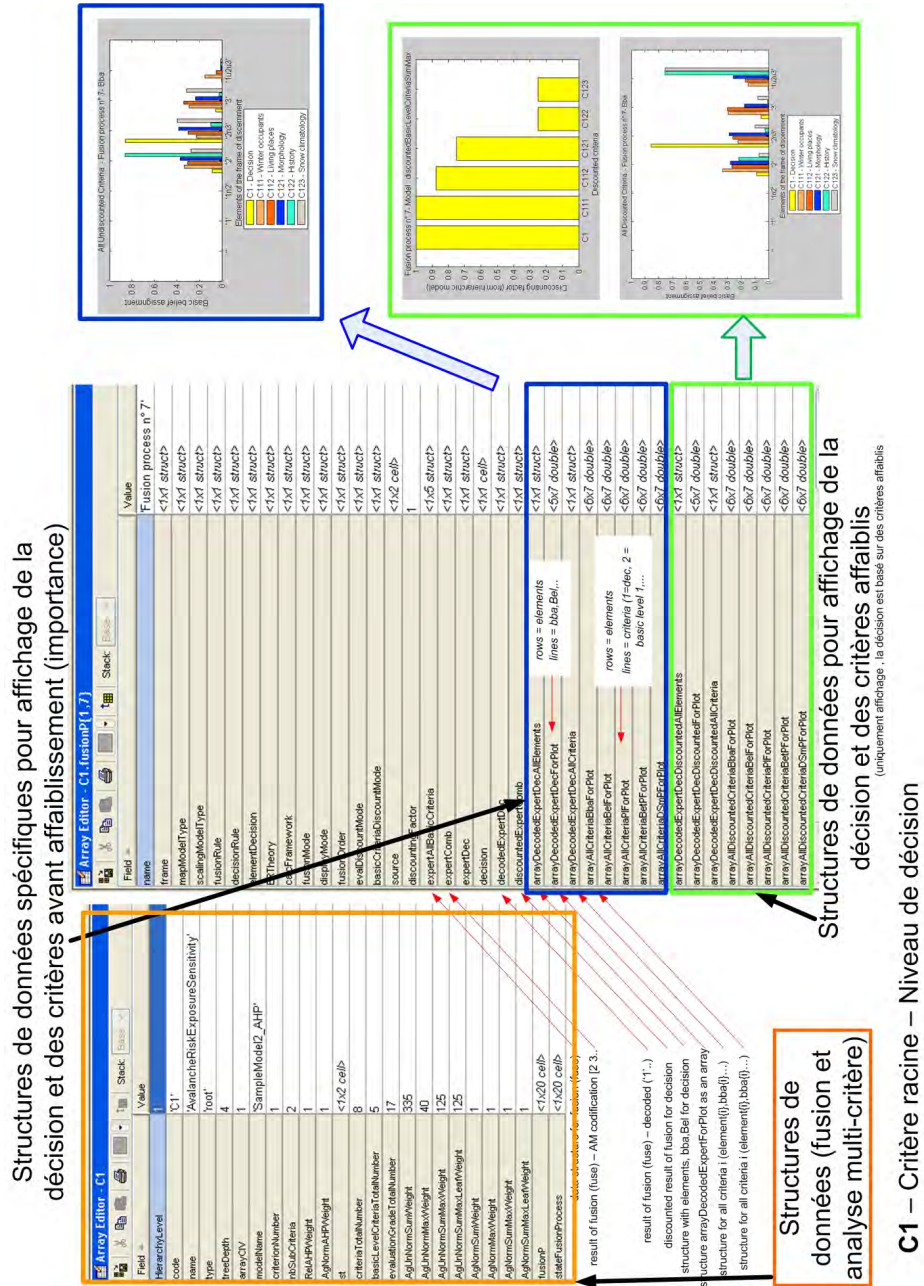


FIGURE I.7 – Critère racine (Décision) $C_{[1]}$ - Processus de fusion n°7 - Structures de données pour affichage des résultats

I.3.1 Structures de données

Structure du modèle *ER-MCDA*

Les structures de données sur lesquelles est basé le prototype (résultant du modèle *UML*) sont décrites sur la figure Fig. I.8.

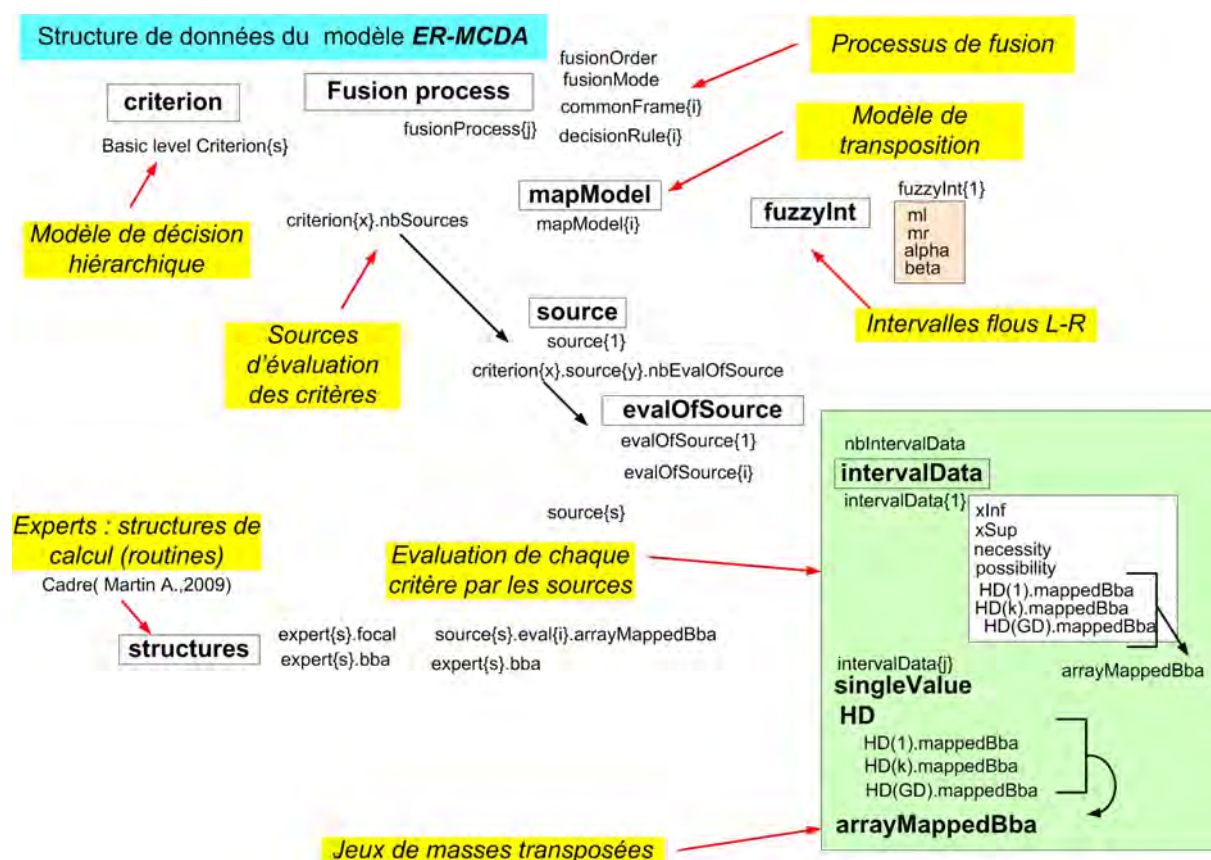


FIGURE I.8 – Structures de données du modèle *ER-MCDA*

Exemples de relations

Pour les critères quantitatifs, la méthodologie *ER-MCDA* implique la définition des modèles de transposition, des intervalles numériques d'évaluation au travers de distributions de possibilités puis leur transposition. Les structures de données permettent de stocker et manipuler tous ces éléments de calcul intermédiaires (FIG. I.9).

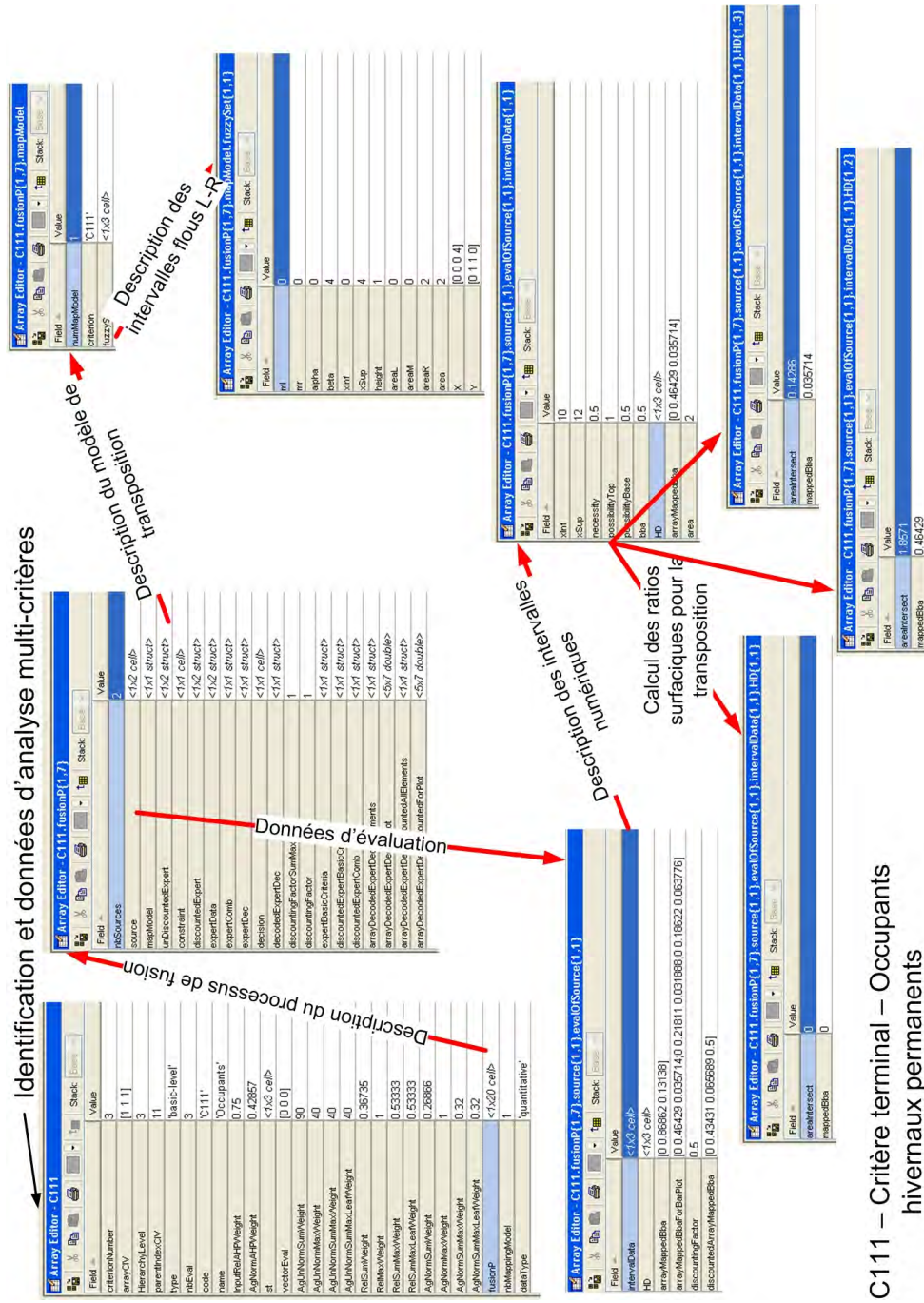


FIGURE I.9 – Critère $C_{[111]}$ (Occupants hivernaux) - Processus de fusion n°7 - Modèle de transposition $DSmT$ - Structures de données pour transposition des évaluations quantitatives

I.3.2 Routines de calcul

Affectation du facteur d'affaiblissement de fiabilité

La routine *discountExpert.m* permet d'affaiblir une source selon le facteur d'affaiblissement (classique) de fiabilité. Les masses des éléments focaux sont réduites et la masse de l'ignorance totale (Θ) est augmentée.

% discount expert

```
function [expert]=discountExpert(CardTheta,expert,numExpert,discountingFactor)

% input :
%   expert structure :
%       - expert(1).focal
%       - expert(1).bba
%       - expert(2)....
%   numExpert : num of expert to discount (an integer)
%   discountingFactor : 0= < a real =<1
%   CardTheta : an integer

% Output :
%   discounted expert : an expert structure

% JM Tacnet Fev 2009

% *** Saving input expert ***

    inputExpert=expert;

% *** Saving discounting factor in expert structure if discounting factor was not existi
    if ~isfield(expert(numExpert),'discountingFactor')
        % discounting factor did not exist before
        expert(numExpert).discountingFactor=discountingFactor;
    end

if discountingFactor<1
    % *** Creating code for Theta

        for i=1:CardTheta
            iString=num2str(i);
            if i==1
                txtCodeTheta=[iString,'u'];

                elseif i==CardTheta
                    txtCodeTheta=[txtCodeTheta,iString];
                else
                    txtCodeTheta=[txtCodeTheta,iString,'u'];
                end

        end

    % *** Discount ***
        sizeExpertFocal=size(expert(numExpert).focal,2);

        % --- Searching if Theta exists in initial expert structure ---

            foundTheta=0;
```

```

for i=1:sizeExpertFocal

    if strcmp(expert(numExpert).focal(i),txtCodeTheta)
        % Theta already exists in initial expert(numExpert).focal
        foundTheta=1;
        indTheta=i;

    end

end

% --- Adding Theta to expert(numExpert).focal ---

if foundTheta==0
    % Theta does not exist in expert(numExpert).focal : creates Theta
    expert(numExpert).focal=[expert(numExpert).focal,{txtCodeTheta}];
    sizeExpertFocal=size(expert(numExpert).focal,2);
end

% --- Discounting expert(numExpert).bba ---

for i=1:sizeExpertFocal
    if strcmp(expert(numExpert).focal(i),txtCodeTheta)
        % assigning Bba of Theta
        if foundTheta==1
            % Theta was already existing before discounting
            initialBbaOfTheta=inputExpert(numExpert).bba(indTheta);
            expert(numExpert).bba(i)=1-discountingFactor
                + discountingFactor*initialBbaOfTheta;
        else
            % Theta has been created - Theta had no initial Bba
            expert(numExpert).bba(i)=1-discountingFactor;
        end
    else
        % other focal elements
        expert(numExpert).bba(i)=discountingFactor
            *inputExpert(numExpert).bba(i);
    end

end

end
end

```

Affectation du facteur d'affaiblissement d'importance

```

% discount importance expert
% experimental process with bba assignment on emptySet
function [expert]=discountImportanceExpert(CardTheta,expert,numExpert,

```



```

discountingImportanceFactor)

% test : [expert]=discountExpert(4,expert,1,1)

% input :
%   expert structure :
%       - expert(1).focal
%       - expert(1).bba
%       - expert(2)....
%   numExpert : num of expert to discount (an integer)
%   discountingFactor : 0= < a real =<1
%   CardTheta : an integer

% Output :
%   discounted expert : an expert structure

% JM Tacnet Fev 2009

% *** Saving discounting importance factor in expert structure
%   if it was not existing before ***

    if ~isfield(expert(numExpert),'discountingImportanceFactor')
        % importance discounting factor did not exist before
        expert(numExpert).discountingImportanceFactor=discountingImportanceFactor;
    end
;

if discountingImportanceFactor<1

    %*** Creating code for emptySet ***
    txtCodeEmptySet='';

    % *** Discount ***
    sizeExpertFocal=size(expert(numExpert).focal,2);

    % % --- Searching if Empty Set exists in initial expert structure ---

    foundEmptySetInputExpert=0;

    for i=1:sizeExpertFocal

        if strcmp(expert(numExpert).focal(i),txtCodeEmptySet)
            % Theta already exists in initial expert(numExpert).focal
            foundEmptySetInputExpert=1;
            indEmptySetInputExpert=i;
        else

```

```

        disp('Empty Set not found in expert(numExpert).focal at index i');
    end
end

% ---- Adding Empty Set to expert(numExpert).focal

% Initial expert
expertInit(numExpert)=expert(numExpert);
sizeExpertFocalInit=size(expertInit(numExpert).focal,2);

if foundEmptySetInputExpert==0

    % Empty Set does not exist in expert(numExpert).focal :
    %   creates Empty Set at the beginning
    expert(numExpert).focal=
        [{txtCodeEmptySet},expertInit(numExpert).focal];
    expert(numExpert).bba=[0,expertInit(numExpert).bba];
    sizeExpertFocal=size(expert(numExpert).focal,2);

end

% --- Discounting importance expert(numExpert).bba ---

disp('--- Discounting importance expert(numExpert).bba ---');

for i=1:sizeExpertFocal

    if strcmp(expert(numExpert).focal(i),txtCodeEmptySet)
        disp('Empty Set found in expert(numExpert) at index i ')
        % assigning Bba of EmptySet
        if foundEmptySetInputExpert==1
            disp('EmptySet was already existing before discounting ');
            % EmptySet was already existing before discounting
            initialBbaOfEmptySet=
                inputExpert(numExpert).bba(indEmptySetInputExpert);
            expert(numExpert).bba(i)=1-discountingImportanceFactor
                + discountingImportanceFactor*initialBbaOfEmptySet;
        else
            disp('Empty Set has been created - Empty Set had no initial Bba');
            % Empty Set has been created - Empty Set had no initial Bba
            expert(numExpert).bba(i)=1-discountingImportanceFactor;
        end
    else
        disp('Empty Set not found in expert(numExpert) at index i ')
        % other focal elements

        % Searching elements in inputExpert

        if foundEmptySetInputExpert==0

```

```

                                % Empty Set has been added, index have increased of one
                                expert(numExpert).bba(i)=
                                    discountingImportanceFactor*inputExpert(numExpert).bba(i-1);
                            else
                                % Empty set has not been added, we use the initial index
                                expert(numExpert).bba(i)=
                                    discountingImportanceFactor*inputExpert(numExpert).bba(i);
                            end
                        end
                    end
                end
            end
        end
    end
end

```

Considering uncertainty in the natural risks expertise process using multi-criteria decision analysis and information fusion¹

Speciality : Environment sciences and engineering

Keywords : natural risks, integrated risk management, expertise, uncertainty, information imperfection, information systems, decision, information fusion, Evidence theory, Fuzzy Sets theory, Possibility theory, *Dempster-Shafer* theory (*DST*), *Dezert-Smarandache* theory (*DSmT*) multicriteria decision analysis (MCDA), Analytic Hierarchy Process (*AHP*)

Abstract : Rapid mass movements hazards such as mountain rivers (torrents) and snow avalanches put humans and material assets at risk with dramatic consequences. In a context of lacking knowledge about the natural phenomena, expertise is required to provide analyses for decision and risk management purposes using multi-disciplinary quantitative or qualitative approaches. Expert judgements depend on the availability, quality and uncertainty of information. At the end, phenomenon scenarios and decisions may very well rely on very uncertain and conflicting information without being able to really know what was completely true, imprecise, conflicting or simply unknown in the hypotheses leading to the result.

This work analyses relations between information and decision including the integration of results in information systems. On one hand, it contributes to improve traceability and quality description of the expertise process and, on the other hand, it provides and analyzes multi-criteria aid-decision tools able to consider information imperfection (uncertainty, imprecision) resulting from conflicting sources.

Firstly, we analyze the ability of multi-criteria decision analysis to help risk assessment, including a diagnosis of existing empirical approaches developed to combine the risk components evaluations. On this basis, any hierarchical model can be transformed in an another one, keeping the same decision results and highlighting some new preferences views on the problem such as role and importance of scenarios based on aggravated criteria in the decision.

Secondly, a framework mixing evidential reasoning and multi-criteria decision analysis (*ER-MCDA*) combines qualitative and quantitative criteria on which more or less reliable and conflicting sources provide uncertain and imprecise evaluations. The Analytic Hierarchy Process (*AHP*) is used both to model the problem in a conceptual way and to elicit preferences between key criteria. Fuzzy Sets and Possibilities theories are used to transform quantitative and qualitative criteria into a common frame for Dempster-Shafer Theory (*DST*) and *Dezert-Smarandache* Theory (*DSmT*).

At the end, multi-criteria decision-aid methods can be viewed as a valuable and alternative support for risk components evaluation. Traceability through easily understandable methodologies (hierarchical approaches, fuzzy numbers) and information imperfection assessments can be viewed not only as ways to improve the global quality of the expertise and decision processes but also as creating a new space for interaction between expertise and society. In addition to their technical interest, they may become unexpected but valuable support to an integrated risk management approach.

Prise en compte de l'incertitude dans l'expertise des risques naturels en montagne par analyse multi-critères et fusion d'information²

Spécialité : Sciences et génie de l'environnement

Mots-clés : risques naturels, avalanches, crues torrentielles, gestion intégrée du risque, expertise, incertitude, imperfection de l'information, systèmes d'information, décision, fusion d'information, théorie des fonctions de croyance, théorie des ensembles flous, théorie des possibilités, théorie de *Dempster-Shafer* (*DST*), théorie de *Dezert-Smarandache* (*DSmT*), aide multicritères à la décision, aide multicritères hiérarchique (*AHP*)

Résumé : Les phénomènes naturels gravitaires rapides tels que les avalanches ou les crues torrentielles menacent les biens et les personnes en montagne mais restent mal connus. Dans un contexte de connaissance partielle des phénomènes, l'expertise contribue, par des approches pluridisciplinaires à la fois qualitatives et quantitatives, à identifier les phénomènes, analyser les risques et proposer des mesures structurelles et/ou non-structurelles pour la réduction des risques. Les jugements d'experts dépendent de la qualité des informations disponibles. En fin de compte, les scénarios de phénomènes et les décisions peuvent ainsi reposer sur des informations incertaines et contradictoires sans pouvoir vraiment identifier la part du vrai, de l'imprécis, du contradictoire ou simplement de l'inconnu dans les hypothèses ayant conduit au résultat. Ce travail analyse les relations entre l'information, ses imperfections et la décision. Il vise d'une part l'amélioration de la traçabilité, de l'explicitation et de la qualité des composants du processus d'expertise et, d'autre part, la fourniture et l'analyse des outils d'aide multicritères à la décision capables de considérer l'information imparfaite (incertaine, imprécise) provenant de sources de fiabilité variable et potentiellement conflictuelles.

Dans un premier temps, l'analyse porte sur des méthodes empiriques d'aide multicritères à la décision d'évaluation des composantes du risque. Une méthodologie est proposée pour traduire des modèles existants sous forme hiérarchique puis transformer des modèles hiérarchiques quelconques dans d'autres modèles du même type tout en conservant les mêmes résultats globaux. Cette reconfiguration exhibe des vues différentes des préférences entre critères liées par exemple à l'importance et au rôle de scénarios basés sur une aggravation de critères dans la décision.

Dans un second temps, la méthodologie *ER-MCDA* associe la fusion d'information et l'aide multicritères à la décision. L'aide multicritères hiérarchique à la décision (*AHP*) permet de formuler conceptuellement le problème de décision et d'explicitier les préférences entre les critères. Les théories des ensembles flous et des possibilités sont utilisées pour transformer des critères quantitatifs et qualitatifs dans un cadre de discernement commun de décision associé à la théorie des fonctions de croyance via d'une part, la théorie de *Dempster-Shafer* (*DST*) et, d'autre part, la théorie de *Dezert-Smarandache* (*DSmT*).

Finalement, l'aide multicritères à la décision peut être vue comme une alternative pour l'évaluation des composantes du risque. Elle permet non seulement d'améliorer la qualité globale de l'expertise et du processus de décision mais aussi de créer un nouvel espace d'interaction entre l'expertise et les décideurs publics. Au-delà d'un strict intérêt technique, ces méthodes sont des soutiens aussi inattendus que pertinents dans le cadre d'approches intégrées de la gestion du risque.